



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

Номер 29
Issue 29

2022

УКРАЇНСЬКИЙ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Ukrainian Hydrometeorological Journal

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Ministry of Education and Science of Ukraine

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Odessa State Environmental University

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

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.

№ 29, 2022

Одеса

Одеський державний екологічний університет

2022

Головний редактор

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

Заступники головного редактора

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

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

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

Члени редакційної колегії

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

Редактор англomовних текстів

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

Відповідальний секретар

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

“Український гідрометеорологічний журнал” є спеціалізованим науковим виданням, в якому публікуються результати фундаментальних та прикладних наукових досліджень у напрямках “Гідрометеорологія” (метеорологія і кліматологія; агrometeorologia; гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія; океанологія), “Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів” спеціальності «Науки про Землю» та «Екологічні аспекти природокористування» спеціальності «Екологія» з метою інформування про сучасні наукові досягнення українських та зарубіжних дослідників, розвитку вищої освіти, оприлюднення результатів наукових досліджень з теоретичних та прикладних аспектів вирішення актуальних проблем у відповідних або суміжних областях науки.

Журнал призначений для науковців, науково-педагогічних працівників закладів вищої освіти, студентів, аспірантів та докторантів, фахівців у галузі природничих наук за спеціальностями «Науки про Землю» та «Екологія».

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

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

Editor-in-Chief

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

Deputies of Editor-in-Chief

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

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

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

Members of the Editorial Board

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

Editor of texts in English

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

Executive Secretary

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

ЗМІСТ

CONTENTS

Метеорологія і кліматологія

Meteorology and Climatology

Степаненко С. М., Хоменко І. А. Щодо концепції розвитку системи кліматичного обслуговування в Україні

5 Stepanenko S., Khomenko I. On the concept of climate services development in Ukraine

Агromетеорологія

Agricultural Meteorology

Ляшенко Г. В., Данілова Н. В., Колосовська В. В., Толмачова А. В. Тенденція зміни агрокліматичних умов формування урожайності проса до 2050 року в Степовій зоні України

20 Lyashenko H. V., Danilova N. V., Klosowska V. V., Tolmachova A. V. Tendency for change of agroclimatic conditions for formation of millet yield by 2050 within the Steppe zone of Ukraine

Гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія

Hydrology and Water Resources, Hydrochemistry

Тучковенко Ю. С., Хохлов В. М., Лобода Н. С. Вплив змін клімату на водний баланс квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я

32 Tuchkovenko Yu., Khokhlov V., Loboda N. Climate change impact on water balance of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast

Океанологія

Oceanography

Виноградов О. К., Богатова Ю. І., Синьогуб І. О. Абіотичні особливості екосистем Сухого і Григорівського лиманів як акваторій морських портів (північно-західна частина Чорного моря)

48 Vinogradov A. K., Bogatova Yu. I., Synyogub I. A. Abiotic features of Sukhyi and Grygorivskyi estuaries' ecosystems as seaport water areas (northwestern part of the Black Sea)

Ільїн Ю. П., Берлінський М. А. Балансова модель транспорту та метаболізму розчинених форм азоту і фосфору в системі Дністровського лиману

59 Ilyin Yu. P., Berlinsky N. A. Balance model of dissolved nitrogen and phosphorus transportation and metabolism in the Dniester estuary system

Тучковенко Ю. С., Кушнір Д. В. Моделювання мінливості гідрологічних характеристик Тузлівської групи лиманів за різних варіантів їх водообміну з морем

68 Tuchkovenko Yu. S., Kushnir D. V. Modeling of variability of hydrological characteristics of the Tuzla group of lagoons under various variants of their water exchange with the sea

**Екологічні аспекти
природокористування**

**Environmental Aspects of
Nature Management**

Домбровський К. О., Рильський О. Ф. Мікро- та макрофауна донних безхребетних гирлової ділянки малої річки Мокра Московка в межах міста Запоріжжя **85**

Dombrovskiy K. O., Rylsky A. F. Micro- and macrofauna of benthic invertebrates of the estuary section of the Mokra Moskovka, a small river in the City of Zaporizhzhia

Чугай А. В., Терземан В. В. Прогнозування забруднення атмосферного повітря міста Одеса діоксидом азоту **95**

Chugai A. V., Terzeman V. V. Forecasting the atmospheric air pollution caused by nitrogen dioxide in the City of Odesa

УДК: 551.583.2

ЩОДО КОНЦЕПЦІЇ РОЗВИТКУ СИСТЕМИ КЛІМАТИЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ В УКРАЇНІ

С. М. Степаненко, І. А. Хоменко

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, stepanenko@odeku.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-6343-3968>

Зміна клімату призводить у кожному регіоні як до помітного посилення інтенсивності та впливу екстремальних гідрометеорологічних явищ, так й до появи нових кліматичних загроз. Тому вкрай актуальними є розроблення та реалізація заходів з адаптації до наслідків кліматичних і погодних екстремальних явищ, пов'язаних із сучасним глобальним потеплінням. Одним з найважливіших пріоритетів стратегій адаптації до наслідків зміни клімату є впровадження національних/регіональних систем кліматичного обслуговування. У даній статті запропоновано шляхи вирішення актуального та важливого для України завдання – створення національної системи кліматичного обслуговування, а також проведено аналіз ролі національної гідрометеорологічної служби України в цьому процесі.

Україна має розгалужену мережу гідрометеорологічних спостережень та моніторингу. Національна гідрометеорологічна служба також має багаторічний позитивний досвід та науково обґрунтовані методики створення та розповсюдження кліматичної інформації. Але створення національної системи кліматичного обслуговування потребує суттєво іншого рівня взаємодії між постачальниками кліматичної продукції, науковцями та споживачами кліматичного обслуговування, включно з урядом, громадянським суспільством, громадою, приватним сектором, технічними партнерами і донорами, тобто потребує переходу від нинішньої системи створення та розповсюдження кліматичної інформації у вигляді стандартних довідок, які містять базові кліматичні показники, до нової системи створення та розповсюдження кліматичної продукції із застосуванням сучасних інформаційно-комунікаційних систем.

В якості організаційної форми такої постійно працюючої взаємодії та розбудови системи кліматичного обслуговування запропоновано створення Ради з питань кліматичного обслуговування в структурі урядової Міжвідомчої комісії з питань зміни клімату та збереження озонового слою. Розглянуто завдання та функції цього організаційного механізму.

На основі проведеного широкомасштабного анкетування та опитування як постачальників, так й споживачів кліматичних послуг в Україні, в статті наведено перелік проблем національної гідрометеорологічної служби, які гальмують реалізацію рекомендацій Всесвітньої метеорологічної організації, і надано аналіз наявних можливостей їх вирішення. Серед найважливіших проблем, які потребують нагального вирішення, було зазначено: (1) технічне переобладнання та збереження мережі кліматичних станцій, (2) розвиток кадрового потенціалу служби через наявну систему підготовки фахівців та підвищення кваліфікації, (3) координація наукових досліджень в сфері знань про минулий, теперішній і майбутній стан регіонального клімату, зокрема, розроблення методик оцінювання кліматичних загроз, пов'язаних із поточним кліматом і сценаріями його майбутньої зміни, оцінки вразливості до мінливості і зміни клімату для спільноти загалом і певних галузей економіки.

Ключові слова: адаптація до зміни клімату; кліматичне обслуговування; національна гідрометеорологічна служба; глобальна рамкова основа для кліматичного обслуговування

1. ВСТУП

Глобальне потепління вже сьогодні призводить до серйозних змін у кліматичній системі. При сучасному потеплінні приблизно на 1,1 °C вище доіндустріальних середньорічних значень [1], ці впливи відчуються швидше та інтенсив-

ніше, ніж прогнозувалося раніше [2]. Частота та інтенсивність кліматичних і погодних екстремальних явищ зросли через кліматичні зміни, спричинені людиною [1], й очікується, що такі впливи, як міграція через екстремальні кліматичні явища, зростатимуть з додатковим розігрі-

ванням глобальної кліматичної системи [2].

Кожен регіон зазнає екстремальних погодних впливів через сучасну зміну клімату [2-4]. Так, наприклад, кількість потенційно смертельних випадків спеки подвоїлася у світі між 1979 і 2017 роками [5], тоді як смертність, пов'язана зі спекою, яка супроводжується високою вологістю повітря (т.зв. «волога спека»), серед людей старших за 65 років зросла на 53,7% [6]. Очікується, що такі смертельні вологі спеки перетворяться на звичайне явище в тропіках при підвищенні середніх глобальних температур понад 1,5 °C [7, 8]. Збільшення кількості випадків вологої спеки також знижує продуктивність праці: поточні втрати річного валового внутрішнього продукту в тропічних країнах становлять до 6% [6] і нелінійне зростання в умовах потепління [9]. Крім того, з'явилося багато нових проблем через зворотний зв'язок між потеплінням та екстремальною погодою [3], а також ризиком перетину ще до кінця невизначених переломних точок неповернення [10], кількість яких тільки збільшується з подальшим розігріванням кліматичної системи [1, 11].

Нещодавно у Шостому оціночному звіті (AR6) Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC) [1] було переглянуто класифікацію часових періодів, у яких вивчаються наслідки сучасної зміни клімату: **короткострокові зміни**, які належать до часового періоду від сьогодні до 2040 року, **середньострокові зміни** – з 2041 до 2060 року та **довгострокові зміни**, які охоплюють періоди після 2060 року. У разі постановки завдань на довгостроковий період найголовнішою метою має бути декарбонізація задля досягнення чистих нульових викидів вуглекислого газу та інших парникових газів. В той же час, вже зараз і у короткостроковій перспективі вкрай актуальними є розроблення та реалізація заходів з адаптації до наслідків кліматичних і погодних екстремальних явищ, пов'язаних із сучасною зміною клімату.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Третя Всесвітня кліматична конференція (10.2009р.) визначила одним з пріоритетів стратегій адаптації до наслідків зміни клімату впровадження національних/регіональних систем кліматичного обслуговування. З метою сприяння більш ефективному оперативному кліматичному обслуговуванню на національному та регіональному рівнях Всесвітня метеорологічна організація (ВМО) у 2011 році створила та розвиває міжнародний механізм "Глобальна рамкова основа

для кліматичного обслуговування" (ГРОКО) [13-20], який складається з п'яти компонентів (рис.1). Одним із центральних принципів ГРОКО є формування *системи кліматичного обслуговування* сумісно зі споживачами кліматичної продукції.

Станом на сьогодні є багато визначень поняття "кліматичне обслуговування" (наприклад, [13, 18, 22, 32-36]). Узагальнюючи та критично осмислюючи наявні визначення, під **кліматичним обслуговуванням** будемо розуміти 1) створення сукупності інформаційної кліматичної продукції та надання її споживачеві у замовленому їм вигляді з використанням тих чи інших засобів комунікації та презентації і 2) взаємодію зі споживачами кліматичної продукції, зокрема населенням, з метою наближення кліматичної продукції до потреб споживачів та розширення номенклатури цієї продукції.

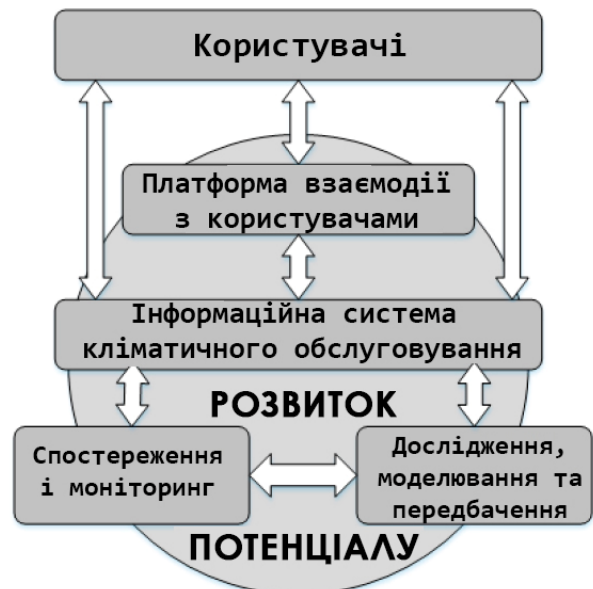


Рис. 1 – Основні компоненти ГРОКО (Схема адаптована з [13])

Fig. 1 – Main components of the Global Framework for Climate Services (GFSC). The scheme is adapted from [13]

Кліматичну продукцію будемо визначати як інформаційний продукт, пов'язаний із кліматом, наданий разом з іншою відповідною інформацією, в перетвореному вигляді, придатному для її використання споживачем (від цифрових масивів і довідників, аналітичних оглядів і рекомендацій до стратегій і планів адаптації).

Це перетворення пов'язаних з кліматом даних разом з іншою інформацією, створює новий вид продукції, а саме *індивідуалізовану кліматичну продукцію*, яка синтезує 1) кліматичні дані; 2) економічну (медичну тощо) інформацію щодо вразливості індивідуального споживача

(галузі економіки загалом); 3) майбутні тенденції; 4) економічний аналіз та оцінки (включно з оцінкою технологій); 5) консультації осіб, що приймають рішення, з метою надання їм допомоги в ефективному управлінні кліматичними ризиками і можливостями, які виникають через мінливість і зміну клімату; 6) розробку і оцінку рішень і 7) будь-які інші послуги, пов'язані з кліматом, що можуть бути корисні для суспільства загалом.

З огляду на вимоги та рекомендації, викладені у [18, 21], кліматичне обслуговування, як система, має включати в себе:

- накопичення знань про минулий, поточний і майбутній стан кліматичної системи, зокрема аналіз кліматичних загроз, пов'язаних з теперішнім кліматом і майбутніми сценаріями його зміни;

- оцінювання уразливості до мінливості і зміни клімату суспільства в цілому й у конкретних соціальних та економічних секторах, а також визначення варіантів адаптації, розширення можливостей для планування і здійснення адаптації та ін.;

- визначення типу і форми кліматичного обслуговування, в тому числі форми надання кліматичної продукції, в залежності від кліматичної вразливості потенційних споживачів, ступеню їх обізнаності та готовності включати інформацію про клімат і його наслідки в плани, регламенти роботи тощо;

- розроблення та надання рекомендацій та низки продуктів на основі знань про клімат, його зміни на різних часових періодах з обов'язковим урахуванням виявлених потреб потенційних споживачів;

- організація та підтримання широкого міжгалузевого діалогу між розробниками кліматичної продукції та її споживачами з метою удосконалення, розширення спектру кліматичної продукції та її наближення до індивідуальних потреб та можливостей споживачів;

- ефективне поширення серед потенційних споживачів, зокрема населення, інформації про наявну кліматичну продукцію, знань та інформації, пов'язаних із кліматом та його зміною, які можуть бути в подальшому використані для зниження кліматичних ризиків стихійних лих і підвищення добробуту населення.

З вище зазначеного можна виділити три кола завдань, які потребують залучення фахівців з різних галузей знань:

- фахівці у галузі кліматичних досліджень, спостережень та їхньої обробки, роль яких поля-

гає в оцінюванні динаміки сучасних і появі нових кліматичних загроз, пов'язаних зі зміною клімату;

- фахівці у галузях економіки, охорони здоров'я та комунальних служб, які мають оцінити ступінь вразливості окремих галузей до виявлених кліматичних загроз та визначити через кліматичні ризики ступінь неприйнятності тієї чи іншої кліматичної загрози, а також сформувати стратегії/плани адаптації до цих загроз;

- фахівці у галузі комунікації, засобів масової інформації, роль яких полягає у формуванні всеосяжної взаємодії між виробником, постачальником і споживачем кліматичної інформації та в її ефективному поширенні в суспільстві.

Отже, **систему кліматичного обслуговування** можна визначити як сукупність кадрового потенціалу, інфраструктури, яка забезпечує реалізацію завдань кліматичного обслуговування, та нормативно-правового забезпечення цієї діяльності.

Формування на національному рівні системи кліматичного обслуговування та організації його систематичного надання в розумінні ГРОКО вимагають істотної взаємодії між постачальниками кліматичної продукції, науковцями та користувачами кліматичного обслуговування, включно з урядом, громадянським суспільством, громадою, приватним сектором, технічними партнерами і донорами. Ця взаємодія має відбуватися за участю осіб, які приймають рішення, політиків, місцевих користувачів, вчених-кліматологів і експертів в окремих секторах.

Шляхи вирішення проблеми. Розвиток системи кліматичного обслуговування є актуальним та важливим для України завданням [22, 23], невід'ємною складовою реалізації будь-яких стратегій, планів адаптації до зміни клімату в Україні. Створення українського сегменту Глобальної рамкової основи кліматичного обслуговування включено у якості прикладної складової реалізації завдань проекту Державної науково-технічної програми у сфері зміни клімату до 2030 року [24].

Створення в Україні системи кліматичного обслуговування, як це впливає з її визначення, має міжвідомчий характер – у цьому процесі мають брати участь Державна служба України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), до складу якої входить національна гідрометеорологічна служба, Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України (Міндовкілля), до функцій якого входить [25] регулювання негативного антропогенного впливу на зміну клімату та *адаптації до його змін* і виконання вимог Рамкової конве-

нції ООН про зміну клімату та Кіотського протоколу до неї, Паризької угоди; Національна академія наук України (НАН) і Міністерство освіти і науки України (МОН), інші міністерства та відомства. Координатором міжвідомчої взаємодії зазначених відомств в процесі розбудови системи кліматичного обслуговування, на нашу думку, має стати **Міжвідомча комісія з питань зміни клімату та збереження озонового слою**, яка була створена постановою Кабінету Міністрів України від 23.09.2020р. № 879 [26], до завдань якої належать, зокрема "...координація діяльності центральних органів виконавчої влади щодо розроблення проектів планів заходів та державних цільових програм щодо адаптації до зміни клімату...".

Але знайти сліди роботи цієї комісії в інтернет-мережі не уявляється можливим, не має навіть сайту комісії або будь-яких посилань на її рішення.

Як було зазначено вище, важливим складником національної системи кліматичного обслуговування, її сталості є її «законодавче та нормативне забезпечення, тобто створення сприятливого «інституціонального ландшафту». На жаль, в Україні поки що в жодному нормативно-правовому документі, в тому числі в Законі України «Про гідрометеорологічну діяльність» від 18.02.1999р. № 443-XIV [27] (до речі, навіть термін «клімат» в цьому 10-сторінковому документі зустрічається лише один раз), не введено визначення кліматичного обслуговування, його структури, регламентації та відповідальності центральних органів виконавчої влади щодо здійснення цього обслуговування тощо.

Водночас, в Україні в прийнятих нормативно-правових документах фрагментарно вже визначені окремі елементи, на базі яких можна будувати систему кліматичного обслуговування. До них належать Національний план заходів із реалізації положень Кіотського протоколу, затверджений Кабінетом Міністрів України [28], згідно з яким мали бути розроблені Національний, регіональні та галузеві плани адаптації до зміни клімату; Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» [29], в якому було поставлене завдання «розвитку галузевих стратегій щодо ... запобігання зміні клімату та адаптації до неї», Концепція реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року [30] та План заходів щодо її виконання [31]. Нещодавно на виконання Указу Президента України № 11/2021 від 23.03.2021р. [32] Кабінетом Міністрів України затверджено Стра-

тегію екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року [33]. До таких документів також можна віднести вже згаданий проект Концепції державної науково-технічної програми у сфері зміни клімату [24]. Але переліченої нормативно-правової бази критично недостатньо для розбудови цілісної системи кліматичного обслуговування в Україні; крім того, поставлені в них завдання або невиконані, або відкладені в часі.

Інфраструктура кліматичного обслуговування передбачає тісну співпрацю кліматологів, як виробників кліматичної інформації, зі споживачами, саме яка дає змогу створювати кліматичну продукцію за допомогою нових підходів у використанні інформації про клімат (на основі аналізу економічних наслідків прийняття тих чи інших рішень і з урахуванням можливостей науки про клімат). Розробники кліматичної інформації мусять бути краще інформовані про різноманітність кліматично зумовлених рішень і про їхню чутливість до зміни кліматичних параметрів. Водночас розробники мусять забезпечити користувачів кліматичною інформацією в тому вигляді та обсягах, які необхідні для оцінювання ризиків і оптимізації відповідних рішень. Реалізація цієї стратегії передбачає більш глибоке розуміння наявних можливостей і обмежень у застосуванні кліматичних даних (зокрема - модельних сценарних прогнозів) з урахуванням специфічних вимог із боку різних груп споживачів.

Тому однією з найважливіших складових національної системи кліматичного обслуговування є створення **міжсекторального механізму взаємодії між розробниками/постачальниками кліматичної інформації та її споживачами**. Цей механізм в міжнародному середовищі дістав назву "*Національна рамкова основа для кліматичного обслуговування (НРОКО)*" [13].

Задумана як національний варіант ГРОКО, НРОКО була запропонована для того, щоб правити національним механізмом, що ліквідує пробіл між кліматичною інформацією, що розробляється науковцями та постачальниками обслуговування з одного боку, і практичними потребами користувачів – з іншого [13]. НРОКО має координувати дії різних установ та відомств України, створивши для них умови для спільної роботи з проектування, створення, передачі, надання та використання кліматичного обслуговування для прийняття рішень в чутливих до клімату секторах соціо- та техносфер країни.

В конкретних умовах України таким міжсекторальним організаційним механізмом, на нашу думку, може стати **Рада з питань кліматичного**

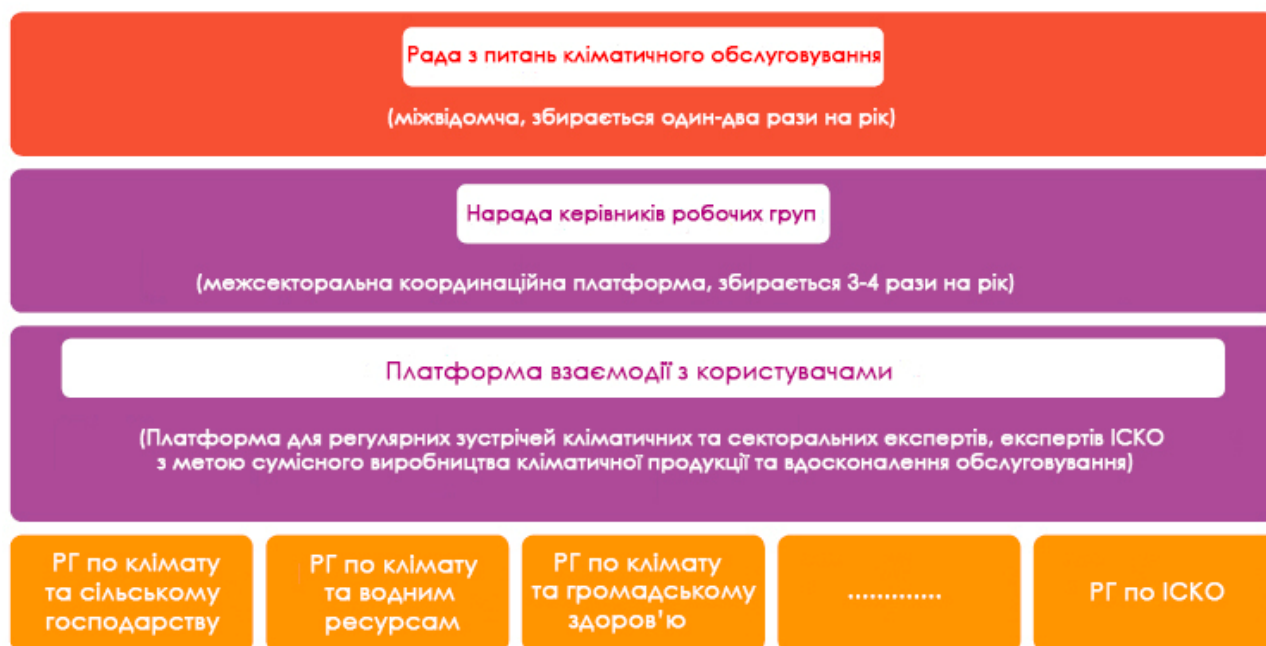


Рис. 2 – Проект схеми реалізації РКО-НРОКО в Україні. Побудована на основі приблизної схеми НРОКО, наведеної у [13]. Тут: ІСКО – інформаційна система кліматичного обслуговування

Fig. 2 – An outline scheme of the Council on Climate Services in the National Framework for Climate Services in Ukraine. The scheme is built on the basis of approximate the Global Framework for Climate Services scheme given in [13]

обслуговування (РКО-НРОКО), яку пропонується створити в межах уже згаданої Міжвідомчої комісії з питань зміни клімату та збереження озонового слою [26]. У складі цієї Ради мають працювати постійно діючі робочі групи за окремими секторами (сільське господарство, водне господарство, охорона здоров'я, енергетика, будівельна сфера, міське господарство, туристична галузь, транспортна галузь тощо). Проект структури Ради з кліматичного обслуговування (НРОКО) наведений на рис. 2.

З погляду менеджменту Рада з питань кліматичного обслуговування має вирішувати такі стратегічні завдання (див. рис. 3):

1) формування системи кліматичного обслуговування, її управління та сталості в країні;

2) розподіл завдань та відповідальності між відомствами щодо формування технології створення/оновлення кліматичної продукції;

3) формування основного пулу бенефіціарів/споживачів кліматичного обслуговування, визнаних у всьому світі (сільське господарство та продовольча безпека; зниження ризиків стихійних лих, пов'язаних зі зміною клімату (кліматичні ризики); енергетика, водне господарство, охорона здоров'я);

4) диверсифікація спектру кліматичних послуг, їхнє наближення до споживача;

5) залучення потенційних споживачів кліма-

тичних послуг до створення/оновлення кліматичної продукції;

6) створення цілісної системи комунікаційної діяльності Ради.

Цей постійно діючий орган, на нашу думку, мусить мати такі функції (див. рис.3):

- налагодження постійного діалогу між робниками кліматичної продукції та різними користувачами на основі принципів співробітництва та взаємодії. Взаємодія через "платформи для користувача інтерфейсів" і схожі механізми є основним елементом структури НРОКО, позаяк дають змогу впровадити зворотний механізм розроблення кліматичної продукції, даних та інформації на основі безпосереднього розуміння того, що реально необхідно конкретним користувачам. Всебічний діалог необхідний між різними групами (від політиків до засобів масової інформації та окремих користувачів), це дасть змогу виявити можливості обробки, виробництва й надання інформації в більшому обсязі і кращої якості;

- визначення пріоритетних видів та форми представлення кліматичної продукції, яка необхідна конкретними споживачам, а також пріоритети її завчасності (сезоні прогнози, прогнози міжрічної мінливості, до 5 років тощо);

- координація заходів з адаптації до зміни клімату на державному та регіональному рівнях,

і насамперед, координація роботи щодо визначення кліматичних ризиків в різних секторах соціо- та техносфер країни як основи економіки адаптаційних заходів. В тому числі узагальнення та розповсюдження кращих практик як зарубіжних, так й місцевих;

- координація освітньої діяльності щодо підвищення кваліфікації осіб, які приймають рішення на всіх рівнях, представників чутливих до клімату секторів соціо- та техносфер країни; підготовки фахівців із кліматичного обслуговування та адаптації до зміни клімату. Крім того, важливою функцією Ради є координація просвітницької діяльності всіх верств населення через соціальні мережі, підготовку та розповсюдження прес-релізів, інформаційних матеріалів.

Інформаційна система кліматичного обслуговування, що є «операційним ядром» РКО-

НРОКО [13], передбачає системний підхід до координації розроблення, архівування та ефективного використання кліматичної інформації особами, які приймають рішення. Така цифрова платформа (ІСКО) сприяє отриманню й обміну інформацією на глобальному, регіональному та національному рівнях і визначає повноваження для державних, приватних, неурядових організацій та науково-освітніх установ. ІСКО має стати головним механізмом, за допомогою якого кліматична інформація всіх часових масштабів - минулого, сьогодення і майбутнього - архівується, аналізується, моделюється, обмінюється й обробляється для використання. Найбільш важливим є те, що ІСКО забезпечує керівні рекомендації щодо якості кліматичної інформації і стандартів надання кліматичного обслуговування.

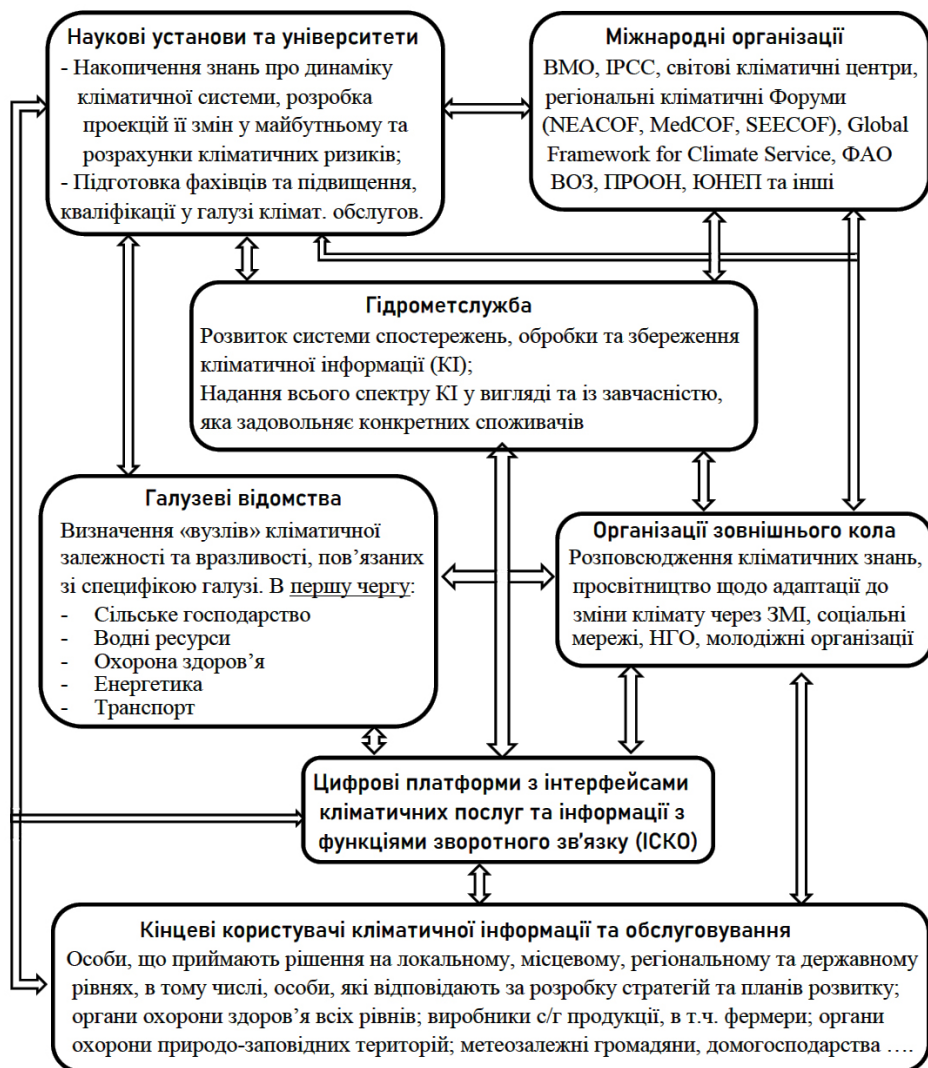


Рис. 3 – Проект схеми взаємодії партнерів в рамках РКО-НРОКО в Україні. Побудована на основі приблизної форми, наведеної у [13]

Fig. 3 – Outline scheme of interaction between partners within the Council on Climate Services in the National Framework for Climate Services in Ukraine. The scheme is built on the basis of a form given in [13]

3. РОЛЬ НАЦІОНАЛЬНОЇ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ СЛУЖБИ В СИСТЕМІ КЛІМАТИЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Основою ГРОКО є [13, 17] «Спостереження й моніторинг» та «Дослідження, моделювання та передбачення» (див. рис.1). Дані спостережень за станом кліматичної системи та її змінами є ключовою інформаційною основою для вироблення, практичної реалізації та оцінювання результативності державної кліматичної політики щодо цілей і шляхів, меж і механізмів адаптації до змін клімату та зниження збитків від погодно-кліматичних впливів. Ці ж дані в їхній сукупності необхідні для верифікації сучасних (насамперед – регіональних) фізико-математичних моделей клімату, які за допомогою сценарного прогнозування стану кліматичної системи дають змогу, зокрема, визначити найважливіші потреби в адаптації до можливої в майбутньому зміни клімату.

Тим самим можна з повною підставою стверджувати, що підтримування на належному рівні і всебічний розвиток потенціалу національної гідрометеорологічної служби України, яка забезпечує довгострокові систематичні спостереження за кліматом, їх обробку та збереження є стержневим завданням забезпечення сталої системи національної системи кліматичного обслуговування.

Згідно з рекомендаціями ВМО [20, 34] національні метеорологічні та гідрологічні служби (НГМС) мають сприяти вирішенню завдань НРОКО через:

- надання ефективної і своєчасної кліматичної інформації, а саме: аналіз поточного клімату і майбутніх сценаріїв зміни клімату з метою оцінки вразливості до зміни клімату і визначення варіантів адаптації, розширення можливостей для планування і здійснення адаптації тощо;

- встановлення партнерських відносин між НГМС і науковими колами, урядами, міжнародними організаціями з метою забезпечення більш широкого охоплення даних та обробки інформації, створення й експлуатації моделей із більш високою роздільною здатністю. Важливим елементом національної системи кліматичного обслуговування має бути її включення в міжнародні консультативні інструменти під егідою ВМО – регіональні кліматичні форуми (РКОФ) [35, 36]. Ці консультативні майданчики є місцем спілкування національних, регіональних та міжнародних експертів з проблем клімату та представників споживачів кліматичних продуктів. Їх ме-

тою є формування регіонального кліматичного прогнозу на сезон [35];

- надання сільськогосподарським підприємствам і фермерам інформації про погоду і клімат, яка може бути особливо корисна при прогнозуванні, підготовці й реагуванні в короткі терміни на ризики для сільського господарства або продовольчої безпеки для вирішення проблем, спричинених екстремальними кліматичними явищами (засухами, екстремальними температурними явищами), а також довгострокові ризики, пов'язані зі зміною клімату, (збільшення частоти циклонів, опустелювання);

- надання наявних історичних і поточних даних про втрати і збитки, кліматичної інформації для прийняття рішень щодо відповідних рівнів інвестицій задля кліматичної адаптації;

- впровадження, спільно з державним і приватним секторами, комплексних систем раннього попередження для значного скорочення числа смертельних випадків, спричинених стихійними лихами, пов'язаними з погодою, водними ресурсами і кліматом, підвищення стійкості суспільства, підтримання продуктивності й економічного зростання і зниження пошкодження власності;

- надання інформації: а) про погоду і клімат, задля допомоги особам, які ухвалюють рішення в галузі охорони здоров'я, зокрема, розуміння механізмів впливу клімату на передачу і виникнення хвороб і виявлення груп ризику, б) про передбачувані тенденції зміни клімату на найближче десятиліття для оцінювання вразливості людини і планування адаптаційних заходів;

- наповнення гідрологічних моделей кліматичними даними для виявлення на різних просторово-часових масштабах ступеня впливу мінливості клімату на водні ресурси з метою удосконалення наявної системи управління та розподілу ресурсів для широкого спектра секторів водоспоживання, включно з міським водопостачанням, іригаційними системами тощо;

- надання розгалуженої і адаптованої інформації про погоду і клімат (історичної і прогнозованої) для початкової оцінки впливу зміни клімату на енергетичні ресурси;

- розроблення методик, стандартів і конкретних проектів для надання допомоги в будівництві і обслуговуванні інфраструктури енерго- та транспортної систем.

Водночас, якщо спуститися на рівень ГМС і ЦГМС основним видом кліматичного обслуговування у сучасному стані є видача стандартних довідок, які містять базові кліматичні показники (див. наприклад, [37]).

У 1992 р за рекомендаціями Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (РКЗК ООН) була створена спільна з ВМО, Міжурядовою океанографічною комісією (МОК / ІОС) ООН з питань освіти, науки і культури, Програмою ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП / UNEP) та міжнародною радою з науки (МСНС / ICSU) Глобальна система спостережень за кліматом (ГССК). Мета створення ГССК полягає в організації довготривалої системи спостережень за глобальною кліматичною системою, яка спирається на вже існуючі національні системи спостережень за атмосферою, океаном і поверхнею суші. ГССК покликана надавати урядам і науковій спільноті повну інформацію щодо всієї кліматичної системи, яка містить низку фізичних, хімічних і біологічних параметрів і характеристик¹.

До складу ГССК включені три основні глобальні складові: приземна кліматична мережа спостережень, аерологічна мережа і мережа морських спостережень. Основними специфічними вимогами до спостережень, які є основою для оцінювання зміни клімату та сформульованими в документах ВМО, є:

- *Тривалість часових рядів даних* достатня для аналізу зміни клімату на часових масштабах від декількох десятиліть і більше (бажано наявність рядів з початку 1950-х рр. або раніше).

- *Репрезентативність пункту спостережень* щодо загального фону кліматоутворювальних та інших природних чинників.

- *Однорідність часових рядів даних*, відсутність в них розривів, зумовлених зміною методів вимірювань і обробки даних, перенесенням або втратою репрезентативності станції протягом періоду спостережень.

- *Однорідність навколишнього середовища* в безпосередній близькості від пункту спостереження протягом періоду спостережень.

- *Співставність даних спостережень* на всьому просторі країни й порівнянність національних даних спостережень з даними аналогічних міжнародних спостережних мереж. Ця вимога впливає з необхідності глобальних оцінок клімату і його змін.

- *Висока якість даних спостережень*, яка відповідає стандартам ВМО, оскільки кліматичні зміни характеристик атмосфери (зміни статистики погоди) відбуваються повільно, і щоб виявити сигнал змін, необхідно мати у своєму розпорядженні спеціальним чином сформовану систему управління якістю – від виконання вимірювань

до отримання кінцевого інформаційного продукту.

Основним об'єктом розвитку мереж спостереження за кліматом і його змінами є і мусить залишатися в майбутньому державна мережа спостережень (ДМС) – і насамперед мережа спостережень національної гідрометеорологічної служби, що складається з декілька мереж спостережень.

Згідно з рекомендаціями ВМО, в складі ДМС виділяються три типи мереж кліматичних станцій спостереження: глобальна, регіональна і національна кліматичні мережі. Мережі мусять бути взаємопов'язаними: кожна станція глобальної мережі має бути частиною регіональної (територія України розташована в регіоні RA-VI (Європа)) і національної мереж.

Найважливішими компонентами системи спостережень за кліматичними змінами в складі ДМС є наземна метеорологічна, аерологічна, гідрологічна, морська гідрометеорологічна мережі спостережень, мережі моніторингу хімічного складу і окремих характеристик атмосфери в рамках Глобальної служби атмосфери (ДСА) ВМО. Особливе місце займають супутникові спостереження за різними складовими кліматичної системи. Супутникові спостереження використовуються, наприклад, при моніторингу хмарності, кріосфери (зокрема, в гірських районах), біосфери, стану гідрологічних об'єктів і прибережних територій.

В Україні мережа реперних кліматичних станцій (РКС) була сформована на базі реперних станцій, які були визначені у 1984 році, та востаннє переглядалася відповідно до наказу Державної гідрометеорологічної служби України від 29.12.2002р. № 92 «Про затвердження Положення про реперну кліматичну станцію та Переліку реперних кліматичних станцій». Хоча згідно з вимогами Стандарту Організації України СОУ 74.90.14–02572508–001:2014 «Реперні кліматичні станції» (пункт 7.6) перелік РКС необхідно уточнювати один раз на 10 років та затверджувати центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері гідрометеорологічної діяльності (МВС України), на підставі пропозицій ЦГО та за поданням Українського гідрометеорологічного центру.

Протягом останніх десятиліть, насамперед, через проблеми бюджетного фінансування, спостерігається стійка тенденція до скорочення кількості пунктів кліматичних спостережень і зменшення обсягів і програм спостережень на ДМС.

Розвиток кліматичних спостережень у рамках

¹ ГССК введений перелік «основних кліматичних характеристик (змінних)» (ECV) [38].

ДМС має включати як підтримання і модернізацію її наявних компонентів, відновлення компонентів, втрачених в останні десятиліття, так і створення нових із дотриманням наведених вище вимог ГССК.

Різноманітність і складність кліматичних процесів вимагають безперервного моніторингу функціонування та оперативного методичного керівництва ДМС, забезпечення життєздатності, технічного (включно з метрологічним) обслуговування, модернізації мережі спостережень (зокрема, їх автоматизацію). Зазначені вимоги не здійсненні без специфічних, проблемно орієнтованих прикладних наукових досліджень, що проводяться Українського гідрометеорологічного інституту з безпосередньою й безперервною взаємодією з оперативними підрозділами національної гідрометеорологічної служби.

Питання відновлення складу, капітального ремонту інфраструктури, технічного оснащення й регулярного переоснащення, а також модернізації та розвитку кліматичної мережі спостережень повинні розглядатися комплексно і вирішуватися планомірно з урахуванням аналізу результатів безперервного моніторингу стану і функціонування підрозділів ДМС, аналізу нових вітчизняних і зарубіжних технологій отримання, збору, передачі, зберігання та формування кліматичної і пов'язаної з нею інформації, необхідної для вирішення науково-технічних, економічних і інших завдань в сфері клімату.

Щодо коштів зацікавлених організацій (банки, страховий бізнес тощо), то можливість їх залучення до розвитку ДМС кліматичного моніторингу (зокрема, в формі приватно-державного партнерства) на цей час потребує детального опрацювання і подальшої поетапної реалізації в рамках РКО-НРОКО. Це певною мірою відповідає і сформованій в теперішній час стратегічній ідеології ВМО, яка містить положення про розвиток партнерства за різними напрямками своєї діяльності із зацікавленими організаціями, включно з приватним сектором.

Розвиток ДМС стосовно кліматичного моніторингу є безперервним багатовекторним процесом, пріоритети якого регулярно актуалізуються залежно від обсягів доступного фінансування і в міру вирішення поточних завдань. Відповідно, фінансування розвитку кліматичного моніторингу (як і забезпечення його сталого функціонування) не може бути разовою акцією, але має стати постійним складником Державного бюджету України.

У Настановах ВМО щодо поетапного створення національної рамкової основи для кліма-

тичного обслуговування [13] пропонується на першому етапі створення НРОКО оцінити наявні можливості для формування системи кліматичного обслуговування. З цією метою в рамках міжнародного проекту ClimEd (*"Multilevel Local, Nation- and Regionwide Education and Training in Climate Services, Climate Change Adaptation and Mitigation"*)² було проведено широкомасштабне анкетування та опитування як постачальників, так і користувачів кліматичних послуг.

Було опитано 48 представників з 15 обласних центрів з гідрометеорології, з двох авіаційних МСЦ, Українського гідрометеорологічного центру, Дунайської гідрометеорологічної обсерваторії, Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського (див. табл. 1). Також в анкетуванні взяли участь деякі синоптики з АМСЦ, оскільки вони також надають кліматичне обслуговування, незважаючи на те, що це не коло їхньої відповідальності.

По-перше, були виявлені проблеми, пов'язані із кадровим потенціалом. Так, в національній гідрометслужбі України бракує відділів кліматології, в багатьох гідрометеорологічних центрах не вистачає спеціалістів-кліматологів, оскільки їхня підготовка тривала досить недовгий час в Україні, і взагалі відсутні спеціалісти, які мають освіту в сфері кліматичного обслуговування. Ефективному виконанню професійних обов'язків може також заважати те, що для виконання цих обов'язків не розроблено належні процедури в галузі кліматичного обслуговування.

Тому в Гідрометслужбі України далеко не завжди послуги в сфері кліматичного обслуговування надають саме спеціалісти-кліматологи, іноді надають спеціалісти, робота яких не стосується кліматології, наприклад, авіаційні синоптики. Наприклад, на питання «Надання кліматичного обслуговування є основною задачею Вашого відділу?» відповідь «так» надали лише 19% респондентів, а 14% відповіли, що це взагалі не є задачею їхнього відділу.

В основному, усі опитувані установи виконують три основні завдання:

- 1) забезпечення кінцевих користувачів короткостроковими прогнозами (88%);
- 2) попередження про небезпечні і стихійні гідрометеорологічні явища (88%) і
- 3) інформація про прогнозовані небезпечні і стихійні гідрометеорологічні явища (83%), тобто виконують обов'язки спеціаліста-метеоролога.

² Електронне посилання: <http://climed.network/>

Таблиця 1 – Організації, в яких було опитано респондентів
Table 1 – Organizations in which respondents were interviewed

№	Назва організації	Кількість респондентів
1	Український гідрометеорологічний центр	1
2	Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського	2
3	Дніпропетровський регіональний центр з гідрометеорології	3
4	Хмельницький обласний центр з гідрометеорології	3
5	Закарпатський обласний центр з гідрометеорології	9
6	Харківський регіональний центр з гідрометеорології	2
7	Кіровоградський обласний центр з гідрометеорології	6
8	АМСЦ Чернівці	1
9	Дунайська гідрометеорологічна обсерваторія	2
10	АМСЦ Рівне Рівненського ЦГМ	3
11	Полтавський обласний центр з гідрометеорології	1
12	Сумський обласний центр з гідрометеорології	2
13	Черкаський обласний центр з гідрометеорології	1
14	Український гідрометеорологічний інститут	1
15	Житомирський обласний центр з гідрометеорології	2
16	Львівський регіональний центр з гідрометеорології	1
17	Волинський обласний центр з гідрометеорології	1
18	Вінницький обласний центр з гідрометеорології	1
19	Тернопільський обласний центр з гідрометеорології	1
20	Запорізький обласний центр з гідрометеорології	1
21	Чернігівський обласний центр з гідрометеорології	1
22	метеостанція Великий Березний	1
23	Миколаївський обласний центр з гідрометеорології	1
24	Чернівецький обласний центр з гідрометеорології	1

З освітою кліматолога в 48 установах працює всього 21% респондентів, з яких 90% мають ступінь магістра в кліматології. 60% відповіли, що вони не мають освіти в сфері кліматології, проте з них 48% мають освіту в галузі метеорології на рівні магістра або навіть кандидата наук. Інші опитувані намагалися браку освіти заповнити курсами і самоосвітою.

З відповідей респондентів з'ясувалося, що 62% респондентів підвищують свою кваліфікацію самостійно, лише 25% спеціалістів використовують курси підвищення кваліфікації в Одеському державному екологічному університеті. Решта респондентів досить ефективно використовують сучасні технології для набуття нових знань: це масові відкриті онлайн курси, курси під егідою ВМО, відкриті форуми і тематичні спільноти у соціальних мережах тощо, але таких усього 13%.

Споживачі, від яких гідрометеорологічні організації мають зворотну реакцію (71%), скаржаться на погану виправдовуваність кліматич-

них прогнозів (33%) і на брак інформації про кліматичні ризики (25%). Кінцевих спостерігачів цікавить інформація щодо невизначеності кліматичних прогнозів, невиправдовуваність кліматичних прогнозів для небезпечних явищ і погана візуалізація кліматичної інформації.

Детальний аналіз ще продовжується, але вже зараз можна описати складності і недоробки, які заважають розвитку кліматичного обслуговування в Україні, крім вищезгаданих проблем:

- недостатня участь користувачів в розвитку кліматичних продуктів і послуг та їхня низька поінформованість про те, що вже є і що може бути корисним;

- неготовність і нездатність більшості користувачів платити за кліматичні продукти і послуги в поєднанні з серйозною недостатністю фінансування Національної гідрометеорологічної служби України (НГМС) та наукових інституцій;

- брак коштів і можливостей для активної взаємодії НГМС із користувачами послуг і засобами масової інформації, для розвитку сучасних

систем спостережень, обробки та збереження інформації;

- проблеми забезпечення кваліфікованими кадрами (залучення й утримання кваліфікованих співробітників) НГМС та наукових інституцій;

- брак винахідливості і кмітливості (зокрема, серйозна нестача юридичної та економічної підтримки) для розвитку та просування нових кліматичних продуктів і послуг;

- низька взаємодія та інтеграція між різними учасниками ланцюга створення нової кліматичної продукції, що ускладнюється проведеними адміністративними реформами, які вносять додаткову неясність в розподіл функцій, повноважень і пов'язаних з цим фінансових коштів;

- зростаюче число альтернативних джерел кліматичної інформації і послуг (зростаюча конкуренція), в поєднанні з незрозумілістю і непрозорістю використання джерел кліматичних даних, які вже застосовуються;

- брак системного підходу до стратегічного планування, що частково пояснює низький попит на інформацію щодо довгострокових тенденцій зміни клімату та можливих наслідків цих процесів на національному, галузевому, регіональному та індивідуальному рівнях.

Отже, формування та розвиток системи кліматичного обслуговування на базі НРОКО потребує, з одного боку, міжгалузевих узгоджених дій (налагодження діалогу з користувачами, вдосконалення управління, тощо) і, з іншого боку, певних дій у галузях економічної та соціальної діяльності:

- посилення взаємодії та діалогу з користувачами кліматичної продукції та розширення можливостей залученням кінцевих споживачів до проектування, впровадження й моніторингу діяльності системи кліматичного обслуговування;

- створення довгострокової та ефективної моделі управління і стійкості в системі кліматичного обслуговування в Україні;

- суттєве розширення і модернізація лінійки кліматичних інформаційних продуктів для забезпечення безперервності послуг з метою задоволення різних потреб користувачів і побудови необхідного потенціалу серед партнерів НРОКО в Україні;

- побудова довгострокових партнерських відносин із пріоритетними галузями в Україні, які є основними одержувачами кліматичних продуктів і послуг НРОКО;

- забезпечення інформованості про систему кліматичного обслуговування серед політичного керівництва, засобів масової інформації та громадськості, що дасть змогу заручитися підтримкою громадськості і політичних кіл.

- стійке відновлення й постійне підвищення кваліфікації персоналу, залученого до системи кліматичного обслуговування та адаптації до зміни клімату.

4. ВИСНОВКИ

Одним з найважливіших пріоритетів стратегій адаптації до наслідків зміни клімату є впровадження національних/регіональних систем кліматичного обслуговування, важливим елементом яких виступає НРОКО.

Україна має розгалужену мережу гідрометеорологічних спостережень та моніторингу. Національна гідрометеорологічна служба також має багаторічний позитивний досвід та науково обґрунтовані методики створення та розповсюдження кліматичної інформації. Але створення національної системи кліматичного обслуговування потребує суттєво іншого рівня взаємодії між постачальниками кліматичної продукції, науковцями та споживачами кліматичного обслуговування, включно з урядом, громадянським суспільством, громадою, приватним сектором, технічними партнерами і донорами, а саме: переходу від нинішньої системи створення та розповсюдження кліматичної інформації у вигляді стандартних довідок, які містять базові кліматичні показники, до системи створення та розповсюдження кліматичної продукції із застосуванням сучасних інформаційно-комунікаційних систем.

У якості організаційної форми такої постійно працюючої взаємодії та розбудови системи кліматичного обслуговування в Україні запропоновано створення Ради з питань кліматичного обслуговування в структурі урядової Міжвідомчої комісії з питань зміни клімату та збереження озонового слою. Розглянуто завдання та функції цього організаційного механізму, аналогу НРОКО.

На основі проведеного у 2021 році широко-масштабного анкетування та опитування як постачальників, так й споживачів кліматичних послуг в Україні в статті наведений аналіз наявних можливостей та проблем національної гідрометеорологічної служби. Запропоновано зосередити увагу на вирішенні таких завдань, як (1) технічне переобладнання та збереження мережі кліматичних станцій; (2) розвиток кадрового потенціалу служби через наявну систему підготовки фахівців та підвищення кваліфікації; (3) координація наукових досліджень в сфері знань про минулий, теперішній і майбутній стан регіонального клімату, зокрема, розроблення методик

оцінювання кліматичних загроз, пов'язаних із поточним кліматом і сценаріями його майбутньої зміни, оцінки вразливості до мінливості і зміни клімату для спільноти загалом і певних галузей економіки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021).
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, H.-O. Pörtner et al., Eds. (Cambridge University Press, 2022).
- Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective / Herring S. C. et al. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2018. 99. Pp. S1–S157.
- “Atlas” in Climate Change 2021: The Physical Science Basis. / Gutiérrez J. M. et al. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Edited by V. Masson-Delmotte et al. IPCC, 2021, pp. 1–196.
- Raymond C., Matthews T., Horton R. M. The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Sci. Adv.* 2020. 6, eaaw1838. Pp.1–8.
- The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: Responding to converging crises / Watts N. et al. *Lancet*. 2021. 397. 129–170.
- Substantial increase in the joint occurrence and human exposure of heatwave and high-PM hazards over South Asia in the mid-21st century / Xu Y. et al. *AGU Adv.* 2020. 1. e2019AV000103.
- Zhang Y., Held I., Fueglistaler S. Projections of tropical heat stress constrained by atmospheric dynamics. *Nat. Geosci.* 2021. 14. Pp. 133–137.
- Spector, Increased labor losses and decreased adaptation potential in a warmer world / Parsons L. A. et al. *Nat. Commun.* 2021. 12. Pp. 7286.
- Степаненко С. М. Динаміка та моделювання клімату : підручник. Одеса: Екологія, 2013.
- Climate tipping points - Too risky to bet against / Lenton T. M. et al. *Nature*. 2019. 575. Pp. 592–595.
- Доклад целевой группы высокого уровня по ГРОКО. ВМО. 2011. № 1065.
- Руководящие указания по поэтапному созданию национальной рамочной основы для климатического обслуживания. ВМО-1206. Женева, 2018. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4553 (дата звернення 15.04.2022)
- Climate Services. A Policy Statement of the American Meteorological Society. URL: [https://www.ametsoc.org/index.cfm/ams/about-ams/ams-statements/statements-of-the-ams-in-force/climate-services1/#:~:text=A%20Policy%20Statement%20of%20the%20American%20Meteorological%20Society&text=Climate%20services%20\(CS\)%20may%20be,on%20their%20decisions%20and%20actions](https://www.ametsoc.org/index.cfm/ams/about-ams/ams-statements/statements-of-the-ams-in-force/climate-services1/#:~:text=A%20Policy%20Statement%20of%20the%20American%20Meteorological%20Society&text=Climate%20services%20(CS)%20may%20be,on%20their%20decisions%20and%20actions) (дата звернення 15.04.2022)
- Martins, H., (Eds) (2020) Matching new demands of Climate Services with evolving Earth system modelling and prediction capabilities. 26 pp. URL: https://www.climateurope.eu/wp-content/uploads/2021/02/Climateurope_D6.11_final.pdf (дата звернення 15.04.2022)
- Market demand for climate services: An assessment of users' needs (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100109>
- Климатическое обслуживание для принятия решений. Краткое введение в Глобальную рамочную основу для климатического обслуживания. ВМО (2014). URL: https://library.wmo.int/?lvl=notice_display&id=16416#.YtXCBH3By3A (дата звернення 15.04.2022)
- Leal Filho W. (2020). Introducing Climate Services and Their Applications. *Handbook of Climate Services. Climate Change Management* / Edited by Leal Filho W. and Jacob D. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36875-3_1
- A European research and innovation roadmap for climate services. European Commission [EC], 2015.
- Climate Services for Supporting Climate Change Adaptation. Supplement to the Technical Guidelines for The National Adaptation Plan Process. WMO. 2016. 1170. 50 p.
- GFCS_Development of the Global Framework for Climate Services at the national level (2013). URL: https://climate-services.org/wp-content/uploads/2015/05/GFCS_step-by-step-guide_national-level.pdf (дата звернення 15.04.2022)
- Кульбіда М. І., Манукало В. О. Кліматичне обслуговування в контексті проблеми зміни клімату: сучасний стан та нові виклики. URL: <http://umhs.org.ua/?p=749> (дата звернення 15.04.2022)
- Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь / Іванюта С. П. та ін.; за ред. С. П. Іванюти. Київ : НІСД, 2020. 110 с. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5_sait.pdf (дата звернення 15.04.2022)
- Повідомлення про оприлюднення проекту розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції Державної науково-технічної програми у сфері зміни клімату до 2030 року». URL: <https://mepr.gov.ua/news/37615.html> (дата звернення 15.04.2022)
- Постанова Кабінету Міністрів України від 27.05.2020р № 425 «Деякі питання оптимізації системи центральних органів виконавчої влади». URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/deyaki-pitannya-optimizaciyi-sistemi-centralnih-organiv-vikonavchoyi-t270520> (дата звернення 15.04.2022)
- Постанова Кабінету Міністрів України від 23.09.2020р № 879 «Про утворення Міжвідомчої комісії з питань зміни клімату та збереження озонового шару». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/879-2020-%D0%BF#Text> (дата звернення 15.04.2022)
- Закон України «Про гідрометеорологічну діяльність» № 443-XIV від 18.02.1999р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/443-14#Text> (дата звернення 15.04.2022)
- Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2005р. № 346-р. «Про затвердження Національного плану заходів з реалізації положень Кіотського протоколу до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/346-2005-%D1%80#Text> (дата звернення 15.04.2022)
- Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення 15.04.2022)
- Розпорядження Кабінету Міністрів України від 07.12.2016р. № 932-р. «Про схвалення Концепції

реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року». URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/249573705> (дата звернення 15.04.2022)

31. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 06.12.2017р. № 878-р. «Про затвердження плану заходів щодо виконання Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/878-2017-%D1%80#Text> (дата звернення 15.04.2022)
32. Указ Президента України №111/2021 від 23.03.2021р. «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 23 березня 2021 року «Про виклики і загрози національній безпеці України в екологічній сфері та першочергові заходи щодо їх нейтралізації». URL: <https://www.president.gov.ua/documents/1112021-37505> (дата звернення 15.04.2022)
33. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2021р. № 1363-р. «Про схвалення Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80#Text> (дата звернення 15.04.2022)
34. Erica Allis, Chris D. Hewitt, Ousmane Ndiaye et al. Future of Climate Service. *Bulletin WMO*. 2019. 68 (1).
35. Regional Climate Outlook Forums. WMO (2016). URL: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=19693#_Yq9gYHZByiN (accessed 15.04.2022)
36. Regional Climate Outlook Products. WMO. URL: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/regional-climate-outlook-products> (accessed 15.04.2022)
37. Методические рекомендации по расчету специализированных климатических характеристик для обслуживания различных отраслей экономики. Строительство, транспорт» – ГГО. С.-П., 2017. 160 с.
38. The Second Report on the Adequacy of the Global Observing Systems for Climate in Support of the UNFCCC. GCOS-82. WMO / TD-№ 1143 (2003), 73 p.

REFERENCES

1. *Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021).
2. Pörtner, H.-O. et al. (eds) (2022). *Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press.
3. Herring, S.C. et al. (2018). Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 99, pp. S1–S157.
4. Gutiérrez, J.M. et al. (2021). “Atlas” in Climate Change 2021: The Physical Science Basis. In: V. Masson-Delmotte et al. (eds). *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC, 2021)*, pp. 1–196.
5. Raymond, C., Matthews, T. & Horton, R.M. (2020). The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Sci. Adv.* 6, eaaw1838, pp.1–8.
6. Watts, N. et al. (2021). The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: Responding to converging crises. *Lancet*, 397, pp.129–170.
7. Xu, Y. et al. (2020). Substantial increase in the joint occurrence and human exposure of heatwave and high-PM hazards over South Asia in the mid-21st century. *AGU Adv.* 1, e2019AV000103.
8. Zhang, Y., Held, I. & Fueglistaler, S. (2021). Projections of tropical heat stress constrained by atmospheric dynamics. *Nat. Geosci.*, 14, pp.133–137.
9. Parsons, L.A. et al. (2021). Increased labor losses and decreased adaptation potential in a warmer world. *Nat. Commun.*, 12, pp.7286.
10. Stepanenko, S.M. (2013). *Dynamika ta modeliuvannia klimatu [Climate dynamics and modelling]*. Odesa: Ekolohiia (In Ukr.)
11. Lenton, T.M. et al. (2019). Climate tipping points - Too risky to bet against. *Nature*, 575, pp.592–595.
12. *Doklad tselevoy gruppy vysokogo urovnya po GROKO. [The report of the high-level taskforce for the global framework for climate services]*. (2011). WMO-No. 1065. (in Russ.)
13. *Rukovodyashchie ukazaniya po poetapnomu sozdaniyu natsional'noy ramochnoy osnovy dlya klimaticheskogo obsluzhivaniya. [Step-by-step Guidelines for Establishing a National Framework for Climate Services]*. WMO-No. 1206. Zheneva, 2018. Available at: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4553 (accessed 15.04.2022) (in Russ.)
14. *Climate Services. A Policy Statement of the American Meteorological Society*. Available at: [https://www.ametsoc.org/index.cfm/ams/about-ams/ams-statements/statements-of-the-ams-in-force/climate-services1/#:~:text=A%20Policy%20Statement%20of%20the%20American%20Meteorological%20Society&text=Climate%20services%20\(CS\)%20may%20be,on%20their%20decisions%20and%20actions](https://www.ametsoc.org/index.cfm/ams/about-ams/ams-statements/statements-of-the-ams-in-force/climate-services1/#:~:text=A%20Policy%20Statement%20of%20the%20American%20Meteorological%20Society&text=Climate%20services%20(CS)%20may%20be,on%20their%20decisions%20and%20actions) (accessed 15.04.2022) (in Russ.)
15. Martins, H., (Eds) (2020) Matching new demands of Climate Services with evolving Earth system modelling and prediction capabilities. 26 pp. Available at: https://www.climateurope.eu/wp-content/uploads/2021/02/Climateurope_D6.11_final.pdf (accessed 15.04.2022)
16. *Market demand for climate services: An assessment of users' needs* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100109>
17. *Klimaticheskoe obsluzhivanie dlya prinyatiya resheniy. Kratkoe vvedenie v Global'nyu ramochnyu osnovu dlya klimaticheskogo obsluzhivaniya. [Climate services for decision making: a brief introduction to the Global Framework for Climate Services]*. WMO, 2014. Available at: https://library.wmo.int/?lvl=notice_display&id=16416#_YtXCBHZBy3A (accessed 15.04.2022) (in Russ.)
18. Leal Filho, W. (2020). Introducing Climate Services and Their Applications. In: Leal Filho, W., Jacob, D. (eds) *Handbook of Climate Services. Climate Change Management*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36875-3_1
19. *A European research and innovation roadmap for climate services.* European Commission [EC], (2015).
20. *Climate Services for Supporting Climate Change Adaptation. Supplement to the Technical Guidelines for The National Adaptation Plan Process*. WMO-№ 1170, 2016.
21. *GFCS Development of the Global Framework for Climate Services at the national level*. (2013). Available at <https://climate-services.org/wp-content/uploads/2015/05/>

- GFCS_step-by-step-guide_national-level.pdf (accessed 15.04.2022)
22. Kulbida, M.I. & Manukalo, V.O. (2017). *Klimatychne obsluhovuvannya v konteksti problemy zminy klimatu: suchasnyi stan ta novi vyklyky* [Climate services in the context of the climate change problem: current state and new challenges]. Available at: <http://umhs.org.ua/?p=749> (accessed 15.04.2022) (in Ukr.)
 23. Ivaniuta, S.P. (ed.) (2020). *Zmina klimatu: naslidky ta zakhody adaptatsii: analit. dopovid*. Kyiv : NISD. Available at: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5_sait.pdf (accessed 15.04.2022) (in Ukr.)
 24. *Povidomlennia pro opryliudnennia proiektu rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy «Pro skhvalennia Kontseptsii Derzhavnoi naukovy-tekhnichnoi prohramy u sferi zminy klimatu do 2030 roku»*. [Statement on the promulgation of the draft Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On approval of the Concept of the State scientific and technical program in the field of climate change until 2030"]. Available at: <https://mepr.gov.ua/news/37615.html> (accessed 15.04.2022) (in Ukr.)
 25. *Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 27.05.2020r № 425 «Deiaki pytannia optymizatsii systemy tsentralnykh orhaniv vykonavchoi vlady»*. [Cabinet of Ministers of Ukraine Decision of 27 May 2020 # 425 "Some issues of optimizing the system of central executive bodies"] Available at: <https://www.kmu.gov.ua/npas/deyaki-pitannya-optimizaciyi-sistemi-centralnih-organiv-vikonavchoyi-1270520> (accessed 15.04.2022) (in Ukr.)
 26. *Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 23.09.2020r № 879 «Pro utvorennia Mizhvidomchoi komisii z pytan zminy klimatu ta zberezhennia ozonovoho sharu»*. [Cabinet of Ministers of Ukraine Decision of 23 September 2020 # 879 "On the setting-up of the Inter-Agency Commission on Climate Change and Ozone Depletion"]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/879-2020-%D0%BF#Text> (accessed 15.04.2022) (in Ukr.)
 27. *Zakon Ukrainy «Pro hidrometeorologichnu diialnist» № 443-XIV vid 18.02.1999r*. [Law of Ukraine "On Hydrometeorological Activity"]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/443-14#Text> (accessed 15.04.2022) (in Ukr.)
 28. *Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 18.08.2005r. № 346-p. «Pro zatverdzhennia Natsionalnogo planu zakhodiv z realizatsii polozhen Kiotskoho protokolu do Ramkovoï konventsii Orhanizatsii Obiednanykh Natsii pro zminu klimatu»*. [Cabinet of Ministers of Ukraine Order of 18 August 2005 # 346-p. "On Approval of the National Action Plan for the Implementation of the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change"]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/346-2005-%D1%80#Text> (accessed 15.04.2022) (in Ukr.)
 29. *Zakon Ukrainy «Pro Osnovni zasady (stratehiu) derzhavnoi ekolohichnoi polityky Ukrainy na period do 2030 roku»*. [Law of Ukraine "On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the period up to 2030"]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (accessed 15.04.2022) (in Ukr.)
 30. *Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 07.12.2016r. № 932-p. «Pro skhvalennia Kontseptsii realizatsii derzhavnoi polityky u sferi zminy klimatu na period do 2030 roku»*. [Cabinet of Ministers of Ukraine Order of 7 December 2016 # 932-p. "On approval of the Concept for the implementation of state policy in the field of climate change until 2030"]. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/npas/249573705> (accessed 15.04.2022). (in Ukr.)
 31. *Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 06.12.2017r. № 878-p. «Pro zatverdzhennia planu zakhodiv shchodo vykonannia Kontseptsii realizatsii derzhavnoi polityky u sferi zminy klimatu na period do 2030 roku»*. [Cabinet of Ministers of Ukraine Order of 6 December 2017 # 878-p. "On approval of the action plan for the implementation of the Concept for the implementation of state policy in the field of climate change until 2030"]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/878-2017-%D1%80#Text> (accessed 15.04.2022). (in Ukr.)
 32. *Ukaz Prezydenta Ukrainy №111/2021 vid 23.03.2021r. «Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 23 bereznia 2021 roku «Pro vyklyky i zahrozy natsionalnoi bezpetsi Ukrainy v ekolohichnii sferi ta pershocherhovi zakhody shchodo yikh neutralizatsii»*. [Decree of the President of Ukraine №111/2021 of 23 March 2021 "On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine of 23 March 2021" "On challenges and threats to national security of Ukraine in the environmental sphere and priority measures to neutralize them"]. Available at: <https://www.president.gov.ua/documents/1112021-37505> (accessed 15.04.2022). (in Ukr.)
 33. *Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 20.10.2021r. № 1363-p. «Pro skhvalennia Stratehii ekolohichnoi bezpeky ta adaptatsii do zminy klimatu na period do 2030 roku»*. [Cabinet of Ministers of Ukraine Order of 20 October 2021 # 1363-p. "On approval of the Strategy for Environmental Safety and Adaptation to Climate Change until 2030"]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80#Text> (accessed 15.04.2022). (in Ukr.)
 34. Allis, E. et al. (2019). Future of Climate Service. *Bulletin WMO*, 68 (1).
 35. *Regional Climate Outlook Forums*. WMO (2016). Available at: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=19693#Yq9gYHZByiN (accessed 15.04.2022).
 36. *Regional Climate Outlook Products*. WMO. Available at: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/regional-climate-outlook-products> (accessed 15.04.2022).
 37. *Metodicheskye rekomendatsyi po raschetu spetsyalizirovannykh klimaticheskikh kharakteristik dlia obsluzhivaniya razlichnykh otrasley ekonomiki. Stroitelstvo, transport* [Guidelines for the calculation of specialized climatic characteristics for servicing various sectors of the economy. Construction, transport]. HHO, St.-Pb., (2017). (in Russ.)
 38. *The Second Report on the Adequacy of the Global Observing Systems for Climate in Support of the UNFCCC*. GCOS-82. WMO / TD-№ 1143 (2003).

ON THE CONCEPT OF CLIMATE SERVICES DEVELOPMENT IN UKRAINE

S. Stepanenko, I. Khomenko

Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, stepanenko@odeku.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-6343-3968>

Climate change in any region leads to both a noticeable increase in the intensity and impact of extreme hydrometeorological phenomena and to emergence of new climatic threats. Thus it is highly important to develop and implement the measures allowing adaptation to climate and weather extreme phenomena associated with modern global warming. One of the top priorities of climate change adaptation strategies includes establishment of national/regional systems of climate services. The paper offers the ways of addressing such an urgent and important task for Ukraine as establishment of a national climate services system and analyzes the role of the National Hydrometeorological Service of Ukraine in this process.

Ukraine has an extensive network of hydrometeorological observation and monitoring assets. The National Hydrometeorological Service also has many years of positive experience and scientifically valid methods related to creation and distribution of climate information. However, establishing a national climate services system requires considerable improvement of interaction of climate products providers, scientists and climate services end-users, including the government, society, communities, private sector, technical partners and donors. It implies the transition from the current system of climate information formation and distribution in the form of climatic standard reports that contain basic climatic indices and indicators to a new system of climate information formation and distribution with application of modern information and communication systems.

The research considers an option of establishing the Council on Climate Services within the Government's Inter-Agency Commission on Climate Change and Ozone Layer Protection that would provide an institutional framework for permanent interaction and development of such climate services system. It also studies the tasks and functions of this new organizational mechanism.

Based on the results of extensive surveys and interviews of both suppliers and end-users of climate services in Ukraine the paper lists the problems that hamper implementation of the World Meteorological Organization's recommendations and should be resolved by the National Hydrometeorological Service, and analyzes the existing solutions. The following are the most important issues to be addressed as soon as possible: (1) technical re-equipment and maintenance of the Ukrainian network of climatic stations; (2) development of the Service's HR potential via the existing system of training and advanced training; (3) coordination of researches focused on the past, current and future state of the regional climate, in particular, development of techniques for evaluation of climate risks related to the current climate and its future change scenarios, assessment of the society's vulnerability to variability and change of climate in general and the vulnerability of certain sectors of the economy in particular.

Keywords: adaptation to climate change, climate services, the National Hydrometeorological Service, the Global Framework for Climate Services

Подання до редакції : 21. 06. 2022
Надходження остаточної версії : 30. 06. 2022
Публікація статті : 07. 07. 2022

УДК : 633.171 : 58.056

ТЕНДЕНЦІЯ ЗМІНИ АГРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ ФОРМУВАННЯ УРОЖАЙНОСТІ ПРОСА ДО 2050 РОКУ В СТЕПОВІЙ ЗОНІ УКРАЇНИ

Г. В. Ляшенко, Н. В. Данілова, В. В. Колосовська, А. В. Толмачова

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
lgv53@ukr.net, nataliadanilova0212@gmail.com, v.kolosv@ukr.net, tolmach@ukr.net

Сучасна тенденція зміни клімату вимагає в аграрній галузі значного перегляду видового та сортового складу сільськогосподарських культур. Перевага повинна надаватися, особливо в Степовій зоні України, посухостійким культурам, однією з яких є просо. Дослідження агрокліматичних умов формування врожайності проса на найближчі роки є дуже актуальними. У статті розглядається оцінка зміни агрокліматичних ресурсів для Північного та Південного Степу України за сценаріями *RCP4.5* та *RCP8.5* за три десятирічні періоди з 2021-2030, 2031-2040 та 2041-2050 рр. в порівнянні з базовим періодом з 1986 по 2005 рр. Використана базова модель оцінки агрокліматичних ресурсів формування продуктивності сільськогосподарських культур А. М. Польового. В моделі використані метеорологічні та агрометеорологічні дані про температуру і вологість повітря, опади, сонячну радіацію, водно-фізичні властивості та вологість ґрунту, які можна отримати за допомогою стандартних метеорологічних та агрометеорологічних спостережень. За допомогою моделі продукційного процесу рослин визначено агрокліматичні ресурси в період вегетації проса, показники фотосинтетичної продуктивності, встановлено закономірності формування різних агроекологічних категорій урожайності та коливання урожайності культури в умовах зміни клімату за тридцятирічний період з 2021 по 2050 рр. Оцінено зміну вказаних показників як за окремі десятирічні періоди так і в розрізі Північного і Південного Степу. Виявлено, що найбільша зміна показників агрокліматичних ресурсів і продуктивності проса відзначається в Південному Степу. Як для Південного, так і для Північного Степу найбільша різниця цих показників спостерігатиметься за сценарієм зміни клімату *RCP8.5*. Також встановлено, що найбільша зміна показників спостерігатиметься в період з 2031 по 2040 рр., а в наступне десятиріччя величини усіх показників є близькими до даних за базовий період (1986-2005 рр.). За результатами розрахунків за період з 2021 по 2050 рр. за сценаріями *RCP4.5* та *RCP8.5* очікуються сценарні урожаї вищі за базовий період.

Ключові слова: зміна клімату, просо, агрокліматичні ресурси, показники фотосинтетичної продуктивності, агроекологічні категорії врожайів, Степова зона України.

1. ВСТУП

Сучасне потепління викликає значну зміну агрокліматичних умов росту, розвитку та формування продуктивності сільськогосподарських культур. Воно супроводжується істотним підвищенням температури повітря у зимові місяці, збільшенням кількості тривалих відлиг, часового зрушення розвитку природних процесів, змінами тривалості сезонів року, подовженням безморозного періоду та тривалості вегетаційного періоду сільськогосподарських культур, збільшенням теплозабезпеченості вегетаційного періоду, деяким покращенням вологозабезпеченості майже усіх зон України. Можливе зростання частоти екстремальних погодних явищ, загальне зни-

ження вологості ґрунтів та зменшення їхньої родючості, виснаження ресурсів прісної води у південних регіонах країни, деградація ґрунтів. Разом з тим, основною особливістю потепління стала нерівномірність випадіння опадів за окремі періоди року, що призвело до збільшення посушливих явищ. Посухи нерідко співпадають з суховіями, спричиняючи пошкодження рослин у різних фазах розвитку та зменшують їхню продуктивність [1].

Посідаючи ключові позиції за розмірами посівних площ, області півдня України не є провідними щодо урожайності та валового збору основних культур, що свідчить про нестабільність виробництва сільськогосподарської продукції у цьому регіоні, великою мірою зумовлену залеж-

ністю урожаю від клімату взагалі та погодних умов конкретного року. З огляду на природний дефіцит вологи найважливішим кліматичним фактором для отримання стабільних урожаїв є кількість і терміни випадіння опадів [2]. Таким чином, головний ризик щодо стабільності урожайності в областях Півдня щодо продовольчої безпеки пов'язаний із посиленням посушливості.

Щоб вирішити цю проблему, наукове співтовариство має знайти альтернативні культури, які можна було б адаптувати і культивувати, незважаючи на глобальне потепління. Одночасно ці культури повинні виділяти менше парникових газів, бути менш ресурсоемними та багатими на основні та другорядні поживні речовини. Просо - це зернова культура, яка володіє багатьма зі згаданих вище бажаних властивостей в порівнянні з іншими основними культурами (наприклад, пшеницею, рисом і кукурудзою) [3]. Просо - витривала зернова культура з коротким вегетаційним періодом, який становить приблизно 60-100 днів залежно від сорту. Це посухостійка культура, яку можна вирощувати в широкому діапазоні кліматичних умов, а також в посушливих районах завдяки потужній кореневій системі [4]. Більш того, дослідники показали, що просо виділяє менше парникових газів, що може сприяти зниженню внеску агропродовольчого сектору в глобальне потепління [3]. Просо може стати основним продуктом харчування для досягнення цілей в області продовольчої та харчової безпеки. В якості заміни просо також користується перевагою через те, що в порівнянні з такими культурами, як кукурудза і рис, воно менш ресурсоемне; тобто вимагає значно нижчої якості ґрунту і меншої кількості води і добрив [5, 6]. Тому, метою цього дослідження є оцінка впливу зміни клімату на прогнозовану врожайність проса в Північному та Південному Степу України.

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Короткий огляд досліджень впливу агрометеорологічних умов на врожайність проса в умовах зміни клімату свідчить про те, що для оцінки досліджень автори використовували різні критерії, неоднакові за обсягом і повнотою вибірки; отримані висновки стосуються різних територій і не завжди порівнюються.

Для території Китаю згідно майбутнім кліматичним сценарієм, прийняття кліматично розумного управління стало загальною тенденцією для отримання високих та сталих урожаїв проса. У тематичному дослідженні [7] автори використовували модель DSSAT (Система підтримки

прийняття рішень для передачі агротехнології) для оцінки потенційних майбутніх впливів зміни клімату на вирощування проса на північному сході Китаю. Були запропоновані відповідні заходи для адаптації місцевого вирощування проса до майбутніх змін клімату. У порівнянні з базовим періодом (1988-2018 рр.) урожайність зерна проса зміниться на 15,3% (-8,9%) протягом 2020-х років, -8,8% (-10,5%) протягом 2030-х років, -17,7% (0,4%) протягом 2040-х років і -25,0% (-18,3%) протягом 2050-х років в рамках RCP4.5 та RCP8.5. Відповідно майбутнім кліматичним сценаріям кліматично грамотне управління (наприклад, коригування дати сівби, додаткове зрошення) могло б частково компенсувати несприятливий вплив зміни клімату на врожайність проса.

Для Західної Африки [8] були проведені дослідження вирощування проса в яких застосовувались 35 можливих кліматичних сценаріїв. На основі технології і підтвердженні багаторічних польових спостережень для 35 станцій в різних агрокліматичних умовах була використана модель SARRA-H.

Для території Пакистану [10] було використано підхід системного аналізу за допомогою моделі CSM-CERES-Millet для кількісної оцінки зміни клімату та її впливу на просо в посушливих та напівпосушливих кліматичних умовах Пенжабу. Результати за кліматичними сценаріями показали, що відбудеться збільшення мінімальної температури повітря (2,8 °C та 2,9 °C, відповідно для напівпосушливого та посушливого середовища) та максимальної температури повітря (2,5 °C та 2,7 °C, відповідно для напівпосушливого та посушливого середовища) згідно з RCP4.5. Для RCP8.5 спостерігається збільшення мінімальної температури повітря на 4 °C для напівпосушливого та посушливого середовища та збільшення максимальної температури на 3,7 °C та 3,9 °C відповідно для напівпосушливого та посушливого середовища.

Дослідниками [11] модифікована модель CSM-CERES-Pearl проса була використана для оцінки приросту врожаю шляхом модифікації ознак рослин, що визначають тривалість дозрівання врожаю, потенційний урожай та стійкість до посухи та спеки в сортах проса, вирощених у шести місцях посушливої (Гісар, Джодхпур, Біканер) та напівпосушливої (Джайпур, Аурангабад та Біджапур) тропічної Індії та двох місцях в напівпосушливій тропічній Західній Африці (Садоре в Ніамеї та Цинцана в Малі). У всіх місцях дослідження врожайність зменшилася, коли тривалість досягання врожаю зменшилась на

10% як у сучасних, так і в майбутніх кліматичних умовах; однак, 10% збільшення періоду дозрівання врожаю значно збільшило врожайність в Аурангабаді та Біджапурі, але не в інших місцях. Збільшення потенційних ознак урожайності на 10% збільшило врожайність як за кліматичної ситуації в Індії, так і в Західній Африці. За кліматичних змін внесок посухостійкості у врожайність сортів або збільшувався, або зменшувався залежно від зміни кількості опадів на місцях.

В аграрному секторі України просо ніколи не займало провідної ролі серед сільськогосподарських культур. Але воно було і залишається в структурі посівних площ. Підсумовуючи аналіз джерел, слід зазначити, що недостатньо вивченим є вплив зміни клімату на посіви проса при вирощуванні його у посушливих умовах Степу України.

Для Південного Степу України Даніловою Н. В. [12] розглядалися зміни агрокліматичних ресурсів та агрокліматичних умов формування продуктивності проса за різні проміжки часу. Аналіз тенденції зміни клімату виконано шляхом порівняння даних за кліматичними сценаріями *A2* та *A1B* та середніх багаторічних характеристик кліматичних та агрокліматичних показників. Проведена порівняльна характеристика продуктивності проса в умовах зміни клімату за середньо багаторічними даними (1986-2005 рр.) та за сценаріями зміни клімату *A2* і *A1B* (2011-2030 рр. та 2031-2050 рр.).

Аверчевим О. В. [13] висвітлюються питання реакції сортів проса на засолення, підтоплення ґрунтів і вплив умов живлення на врожайність в пожнивних посівах Причорноморського степу України. Результати дослідів по підборі перспективного сорту проса з метою його використання в пожнивних посівах показали, що врожайність коливалася в межах 20-34% по роках досліджень. При цьому розмах варіювання сортів становив від 38% у Веселоподолянського 632 до 49% - у Слобідського і Київського 87. Якщо у вологий 1997 року всі сорту формували досить високий урожай зерна (в середньому 28,5 ц/га), то в наступний сухий рік - в 2,5 рази менше - 11,3 ц/га, що пояснюється істотним впливом умов вирощування (77,8%). За окремими роками сила впливу факторів зовнішнього середовища становила від 14,0 до 57,5%. За результатами екологічного випробування сортів можна вважати, що сорт проса Веселоподолянське 632 є найбільш підходящим для вирощування як у вологі, так і сухі роки, на зрошенні і без нього, що підтверджується показником екологічної стійкості -

відношення врожайності в несприятливих умовах до врожайності в оптимальних умовах.

3. ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз тенденції зміни клімату виконано шляхом порівняння середніх багаторічних характеристик кліматичних та агрокліматичних показників за середньо багаторічний період з 1986 по 2005 рр. (базовий період) [14] з кліматичними сценаріями *RCP4.5* (сценарій стабілізації рівнів парникових газів) та *RCP8.5* (сценарій з дуже високими рівнями викидів парникових газів) [15] за три сценарних періоди: з 2021 по 2030 рр. (І-й сценарний період), 2031 по 2040 рр. (ІІ-й сценарний період), 2041 по 2050 рр. (ІІІ-й сценарний період). Для розрахунків використана базова модель оцінки агрокліматичних ресурсів формування та продуктивності сільськогосподарських культур А. М. Польового [16], яка була модифікована та адаптована з використанням польових спостережень за фенологією, ростом та урожайністю зерна. Базова модель оцінки агрокліматичних ресурсів формування продуктивності сільськогосподарських культур заснована на концепції максимальної продуктивності рослин та має блочну структуру. Враховуючи біологічні особливості культури проса, дозрівання якої проходить трьома етапами, нами моделюються три фази дозрівання зерна проса у волоті. Адаптація складалась з уточнення параметрів моделі. До їх числа входить визначення онтогенетичної кривої фотосинтезу, в якій параметр Σt_l характеризує період, коли спостерігається максимальна інтенсивність фотосинтезу культури.

Предметом досліджень є умови формування агрокліматичних ресурсів, які об'єднують ресурси світла, тепла і вологи, закономірності їх географічної мінливості та їх вплив на ріст, розвиток і формування врожаю проса.

Аналіз потенційного урожаю (*ПУ*), метеорологічно можливого урожаю (*ММУ*), дійсно можливого урожаю (*ДМУ*), урожаю у виробництві (*УВ*), а також їхніх співвідношень і відмінностей дозволяє судити про природні й антропогенні ресурси сільського господарства, а також про ефективність господарського використання цих ресурсів стосовно вирощування проса.

Підвищення рівня $УВ_{зерна}$ і доведення його до $ДМУ_{зерна}$ вимагає ретельного дотримання всіх засобів агротехніки, виконання їх у повній відповідності з агрометеорологічними умовами на конкретному полі. Це є першочерговою задачею

програмування урожаїв, спрямованого на усунення дії різноманітних господарських факторів, які знаходяться у мінімумі.

Наближення $ДМУ_{зерна}$ до $ММУ_{зерна}$ вимагає виконання різноманітних заходів для підвищення родючості ґрунту. Різниця між $ММУ_{зерна}$ і $ПУ_{зерна}$ компенсується за рахунок меліоративних заходів, а також внаслідок правильного підбору сортів і культур, що краще пристосовані до особливостей конкретного клімату. Підвищення рівня $ПУ_{зерна}$ забезпечується головним чином шляхом селекції нових сортів, які будуть мати більш високий рівень урожайності за рахунок ефективного використання сонячної радіації.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Були проаналізовані агрокліматичні умови в Північному та Південному Степу за вегетаційний період проса за період з 1986 по 2005 рр. та за тридцятирічний період з 2021 по 2050 рр., який був розбитий на десятиріччя за сценаріями $RCP4.5$ та $RCP8.5$.

Розглянемо агрокліматичні умови для Північного Степу.

За середньо багаторічними даними (базовий період) середня температура повітря складає $18,4^{\circ}\text{C}$. За умови реалізації сценарію $RCP4.5$ середня температура повітря в І-й та ІІ-й періоди буде нижче на $0,6$ та $0,5^{\circ}\text{C}$, порівняно з базовим періодом, а в ІІІ-й період - на $0,2^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

Кількість опадів за вегетаційний період проса в за базовий період складає 179 мм. В І-й період кількість опадів зменшиться 33 мм і складатиме 146 мм. В ІІ-й період кількість опадів буде близькою до величини базового періоду – 177 мм, а в ІІІ-й період – 119 мм, що на 60 мм менше за величину базового періоду (табл. 1).

За кліматичним сценарієм $RCP4.5$ за період сходи – повна стиглість сумарне випаровування знизиться з 365 мм до 282 мм в І-й період і до 302 мм в ІІ-й період. Випаровуваність збільшиться з 711 мм до 730 мм в І-й період і до 846 мм в ІІ-й період. Як наслідок зменшення кількості опадів погіршаться і умови вологозабезпеченості посівів - відповідно до 76 і 78% від величини базового періоду.

Таблиця 1 – Агrometeorological умови вегетації проса (за період сходи – повна стиглість) в Північному Степу за базовий період (1986-2005 рр.) і до 2050 року за сценаріями зміни клімату $RCP4.5$ та $RCP8.5$

Table 1 – Agrometeorological conditions of millet vegetation (during the period of germination - full maturity) in the Northern Steppe for the base period (1986-2005) and until 2050 according to climate change scenarios $RCP4.5$ and $RCP8.5$

Період, сценарій	Середня температура повітря за період, $^{\circ}\text{C}$	Кількість опадів за період, мм	Сумарне випаровування за період (E), мм	Випаровуваність за період, (E ₀), мм	Вологозабезпеченість (E/E ₀), відн.од.	Сума ФАР, кДж/см ² за період
Базовий період 1986-2005	18,4	179	365	711	0,51	105,0
<i>RCP4.5</i>						
І – й 2021–2030	17,8	146	282	730	0,39	132,1
ІІ – й 2031–2040	17,9	177	302	746	0,40	128,7
ІІІ – й 2041–2050	18,2	119	249	833	0,30	120,9
<i>RCP8.5</i>						
І – й 2021–2030	18,3	137	271	766	0,35	132,9
ІІ – й 2031–2040	18,5	128	227	844	0,27	132,4
ІІІ – й 2041–2050	18,6	175	309	752	0,41	130,7

В III-й період сумарне випаровування зменшиться до 249 мм, а випаровуваність збільшиться на 833 мм, в порівнянні з базовим періодом. В цей період умови вологозабезпеченості будуть гіршими, в порівнянні з I-м і II-м періодом, а відносно базового періоду ця величина не перевищує 59% (табл. 1).

За базовий період величина фотосинтетично активної радіації (ΦAP) за вегетаційний період проса складає 105,0 кДж/см². За сценарієм *RCP4.5* в I-й та II-й періоди очікується збільшення ΦAP до 132,2 та 128,7 кДж/см², що складає 126 та 123% від базового періоду. В III-й період величина ΦAP буде нижчою, ніж в I-му та II-му періодах, але вищою, ніж за базовий період і складатиме 120,9 кДж/см² – 115% (табл. 1).

За базовий період $ПВ$ всієї сухої маси проса складає 1651 кДж/см². В I-й і II-й періоди $ПВ$ збільшиться до 2057 та 1999 г/м²дек, що складає 126 та 121%, а в III-й період – 115% від величини за базовий період (табл. 2).

Рівень метеорологічно можливого урожаю ($ММУ$), який залежить від факторів тепла і вологості, в базовий період складає 852 м²/м². В I-й та II-й періоди $ММУ$ зросте до 897 та 865 г/м²дек, що складатиме 105 та 102% від величини базового періоду. В III-й період, через погіршення умов вологозабезпеченості, $ММУ$ зменшиться до

767 г/м²дек, що складатиме 90% від величини базового періоду (табл. 2).

Під впливом зміни агрокліматичних умов вирощування проса, які розглянуто вище, відбудеться зміна показників фотосинтетичної продуктивності культури, до яких в першу чергу відноситься площа асимілюючої поверхні посівів.

За умови реалізації сценарію *RCP4.5* через зміну агрокліматичних умов впродовж усього періоду вегетації проса площа листкової поверхні в три наступні десятирічні періоди буде меншою (рис. 1а), порівняно з базовим періодом. Так в I-й та II-й періоди площа листкової поверхні в період її максимального розвитку буде становити 4,04 і 3,94 проти 4,74 м²/м² в базовий період. В III-й період очікується збільшення площі листкової поверхні до 4,48 м²/м².

Фотосинтетичний потенціал ($\Phi П$) за базовий за сценарієм *RCP4.5* знизиться від 217,8 м²/м² (в базовий період) до 210,6, 189 і 194,6 м²/м² відповідно в I – III-й періоди (табл. 2).

Величина дійсно можливого врожаю ($ДМУ$), яка визначається з урахуванням природної родючості ґрунту, основним показником якої є баланс гумусу у ґрунті. Баланс гумусу під посівами проса складатиме в перші два періоди 105 і 101% від величини в базовий період, а в III-й період він зменшиться до 91%.

Таблиця 2 – Характеристика забезпеченого агрокліматичними умовами урожаю проса в Північному Степу за базовий період (1980-2005 рр.) і до 2050 року за сценаріями зміни клімату *RCP4.5* та *RCP8.5*

Table 2 – Characteristics of agro-climatic conditions of millet harvest in the Northern Steppe for the base period (1980-2005) and until 2050 according to the climate change scenarios *RCP4.5* and *RCP8.5*

Період, сценарій	Вся суха маса, г/м ² дек			Фотосинтетичний потенціал, м ² /м ² за період	Баланс гумусу, т/га	Урожай проса при вологості 14 %, т/га
	потенційного урожаю	метеорологічно можливого урожаю	дійсно можливого урожаю			
Базовий період (1986-2005)	1651	852	528	189,4	0,074	2,41
<i>RCP4.5</i>						
I – й 2021–2030	2057	897	556	266,4	0,078	2,54
II – й 2031–2040	1999	865	536	293,3	0,075	2,44
III – й 2041–2050	1899	767	476	239,3	0,067	2,17
<i>RCP8.5</i>						
I – й 2021–2030	1907	877	544	269,2	0,076	2,48
II – й 2031–2040	1896	769	477	263,2	0,067	2,17
III – й 2041–2050	1872	940	583	276,6	0,082	2,66

В I-й і II-й періоди величина ДМУ зростає до 556 та 536 г/м²дек, що складатиме 105 та 102% від величини в базовий період. В III-й період ДМУ зменшиться до 476 г/м²дек, що складатиме 90% від величини в базовий період.

Урожай проса за 14%-й вологості зерна в базовий період становить 2,41 т/га (табл. 2). В перші два періоди (2021-2030 і 2031-2040 рр.) урожай зростає до 2,54 та 2,44 т/га, що становитиме 105 та 101% від величини базового періоду, а в III-й період урожай зменшиться до 2,17 т/га, тобто до 90% від величини базового періоду (табл. 2).

При реалізації сценарію RCP8.5 середня температура повітря в період сходи – повна

стиглість в I-й період зменшиться на 0,1 °С від температури за базовий період, а в II-й і III-й періоди спостерігається підвищення температури - на 0,1 та 0,2 °С відповідно (табл. 1).

Кількість опадів I-й і II-й періоди буде нижчою від величини за базовий період на 42 та 51 мм. В III-й період кількість опадів буде близькою до величини за базовий період і складатиме 175 мм, що на 4 мм менше величини за базовий період (табл. 1).

Сумарне випаровування в I-й та III-й періоди зменшиться на 94 і 56 мм. Найбільша величина випаровування буде спостерігатися в II-й період і складатиме 227 мм, що менше від величини за базовий період на 138 мм.

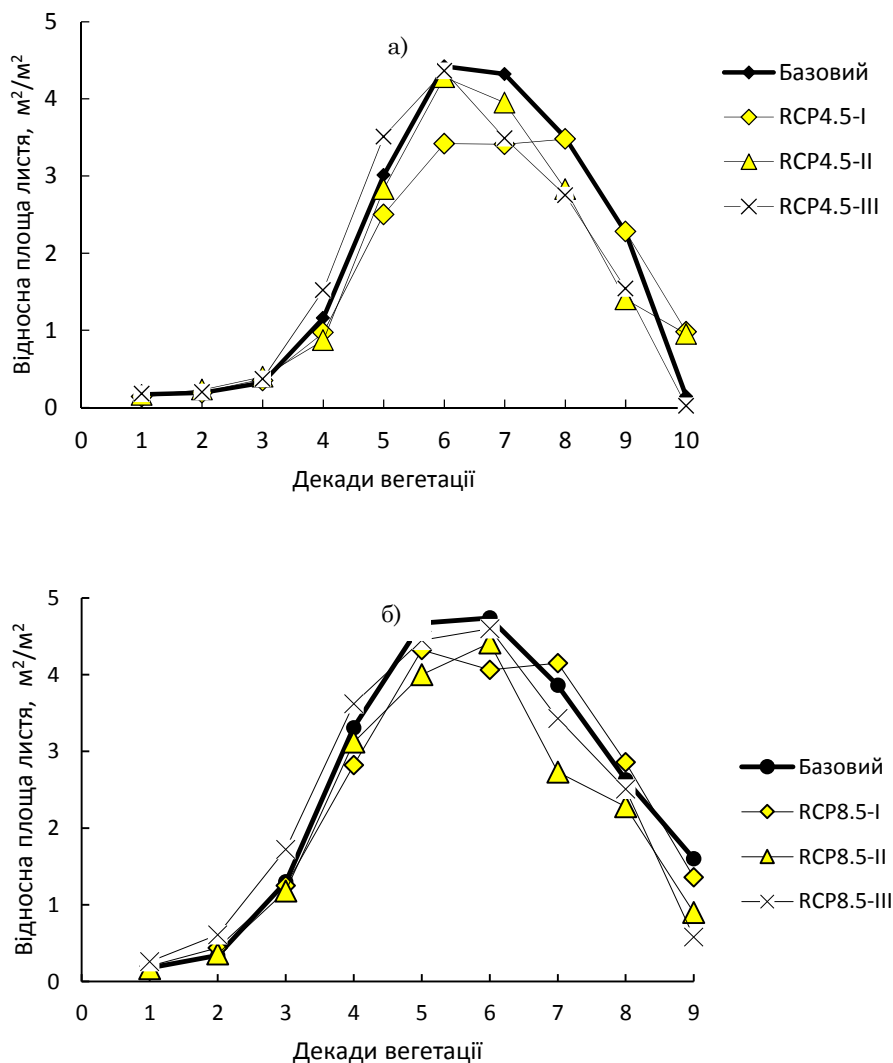


Рис. 1 – Характеристика динаміки площі листя проса впродовж вегетаційного періоду за базовий період та розрахункові дані за наступні три десятиріччя в Північному Степу за сценарієм RCP4.5 (а) та RCP8.5 (б)

Fig 1 – Characteristics of millet leaf area dynamics during the growing season for the base period and estimates for the next three decades in the Northern Steppe under scenarios RCP4.5 (a) and RCP8.5 (b)

Випаровуваність в I-й та III-й періоди зростає до 766 та 752 мм, а II-й період – до 844 мм, що вище від величини за базовий період на 55, 41 і 133 мм. Звідси наочно видно, що II-й період умови вологозабезпеченості будуть гіршими, ніж в I-й та III-й періоди і складатимуть тільки 53% від величини за базовий період.

При реалізації сценарію *RCP8.5* за період сходи – повна стиглість, як і за сценарієм *RCP4.5*, спостерігатиметься збільшення *ФАР* в порівнянні з базовим періодом. Так, величина *ФАР* за сценарієм *RCP8.5* в I-й та II-й періоди зростає до 127 та 126%, а в III-й період - знизиться до 113% від базового періоду (табл. 1).

Відповідно в I-й та II-й періоди буде відзначатися зростання *ПУ* до 1907 та 1896 г/м², що складає 116 та 115% від величини базового періоду. В III-й період буде спостерігатись незначне зниження *ПУ* до 1872 г/м², що складатиме 113% від величини базового періоду (табл. 2).

За умовами реалізації сценарію *RCP8.5* очікується підвищення *ММУ* в I-й і III-й періоди до 877 та 940 г/м²дек, а в II-й період *ММУ* зменшиться до 769 г/м²дек, що становить 103, 110 і 90% від величини за базовий період (табл. 2).

Баланс гумусу під посівами проса в I-й та III-й періоди зростає до 103 та 111%, а в II-й період зменшиться до 90% від величини за базовий період (табл. 2). Величина *ДМУ* в I-й та III-й періоди зростає до 544 та 583 г/м²дек, що складає 103 та 110% від середньо багаторічного. В II-й період *ДМУ* зменшиться до 477 г/м²дек, що становить 90% від середньо багаторічного (табл. 2).

Рівень формування площі листя в впродовж вегетації проса (рис.1б) за умови реалізації сценарію *RCP8.5* буде нижчим, порівняно з базовим періодом. В I-й та II-й періоди площа листової поверхні в період її максимального розвитку зменшиться з 4,74 до 4,32 та 4,41 м²/м². В III-й період, із-за кращих умов тепло- та вологозабезпеченості, очікується трохи вищий рівень площі листя, що складатиме 4,6 м²/м².

Фотосинтетичний потенціал *ФП* за I-й та III-й періоди зростає до 218,5 і 221,0 м²/м², а в II-й період спостерігається його зменшення до 195,3 м²/м², в порівнянні з середньо багаторічним значенням (табл. 2).

За сценарієм *RCP8.5* урожай проса при 14%-й вологості в I-й та III-й періоди зростає до 2,48 і 2,66 т/га, що складатиме 103 та 110% від середньо багаторічного. В II-й період, із-за гірших агрокліматичних умов, буде спостерігатись зниження урожаю до 2,17 т/га, що складає 90% від середньо багаторічного (табл. 2).

Аналогічні дослідження були проведені для території Південного Степу.

За умови сценарію *RCP4.5* в наступні три десятиріччя, порівняно з базовим періодом, ріст та розвиток проса буде проходити за дещо нижчого рівня температури повітря. Так, в I-й і III-й періоди температура повітря знизиться на 0,4 і 0,3 °C від температури за базовий період (18,7 °C), а в II-й період - на 0,5 °C (табл. 3).

Кількість опадів за вегетаційний період проса в базовий період складає 158 мм. В I-й і III-й періоди буде спостерігатись зменшення кількості опадів на 54 і 39, а в II-й – на 25 мм відносно базового періоду. Сумарне випаровування в I-й та III-й періоди знизиться на 111 і 74, а в II-й період – на 84 мм, в порівнянні з базовим періодом (343 мм).

Підвищення температури призведе до підвищення випаровуваності, що потім, в свою чергу, спричинить погіршення умов вологозабезпеченості посівів. Так, в базовий період випаровуваність складає 805 мм. В I-й та III-й періоди вона зростає до 942 і 965 мм, а в II-й період – до 870 мм, що вище на 137, 160 і 65 мм від величини за базовий період.

За середніми багаторічними даними вологозабезпеченість складає 0,41 відн.од. В I-й й III-й розрахункові періоди вологозабезпеченість посівів проса складатиме тільки 60 і 63% від величини за базовий період, а в II-й період, у зв'язку із збільшенням кількості опадів, вологозабезпеченість дещо збільшиться, але на перевищить величину базового періоду – 84% (табл. 3).

Величина *ФАР* за період сходи – повна стиглість за середньо багаторічними даними складає 119,3 кДж/см². За умовами реалізації сценарію *RCP4.5* в I-й та III-й періоди буде спостерігатись підвищення *ФАР* до 138,3 та 134,3 кДж/см², що близько 113% від величини за базовий період. В II-й період очікується збільшення цієї величини до 146,6 кДж/см² - 123% від величини за базовий період (табл. 3).

За базовий період *ПУ* складає 1805 г/м²дек. В наступні три десятиріччя (I-III-й розрахункові періоди) буде відзначатися збільшення цього показника врожайності відповідно до 2096, 2120 і 1923 г/м²дек, що складає від величини в базовий період 116, 118 і 101% (табл. 4).

ММУ, який визначається умовами тепло- і вологозабезпеченості, в базовий період досягає 787 г/м²дек. В I-й й III-й періоди спостерігатиметься його зменшення до 744 і 773 г/м²дек, що складає 94 та 98% від величини за базовий період. В II-й період ця величина буде близькою до

ММУ за базовий період - 788 г/м²дек.

Баланс гумусу у ґрунті під посівами проса складатиме в І-ІІ-й періоди відповідно 96, 100 і 99% від величини за базовий період (табл. 4).

ДМУ всієї сухої маси проса становитиме в І-й й ІІ-й 454 і 472 г/м²дек., що складає 94 і 98 % від величини за базовий період - 480 г/м²дек. В ІІ-й період ДМУ зросте до 481 г/м²дек.

Таблиця 3 – Агrometeorological conditions of millet vegetation (during the period of germination – full maturity) in the Southern Steppe for the base period (1986-2005 pp.) і до 2050 року за сценаріями зміни клімату RCP4.5 та RCP8.5

Table 3 – Agrometeorological conditions of millet vegetation (during the period of germination - full maturity) in the Southern Steppe for the base period (1986-2005) and until 2050 according to climate change scenarios RCP4.5 and RCP8.5

і за сценаріями зміни клімату RCP4.5 та RCP8.5 Період, сценарій	Середня температура повітря за період, °С	Сума опадів за період, мм	Сумарне випаровування за період (Е), мм	Випаровуваність за період, (Е ₀), мм	Вологозабезпеченість (Е/Е ₀), відн.од.	Сума ФАР, кДж/см ² за період
Базовий період 1986-2005	18,7	158	343	805	0,43	119,3
RCP4.5						
І – й 2021–2030	18,3	104	246	942	0,26	138,3
ІІ – й 2031–2040	18,2	133	232	870	0,26	146,4
ІІІ – й 2041–2050	18,4	119	259	965	0,27	134,3
RCP8.5						
І – й 2021–2030	19,2	142	269	875	0,31	136,5
ІІ – й 2031–2040	19,4	117	228	965	0,24	137,0
ІІІ – й 2041–2050	18,2	122	264	910	0,29	124,2

Таблиця 4 – Характеристика забезпеченого агрокліматичними умовами урожаю проса в Південному Степу за базовий період (1980-2005 pp.) і до 2050 року за сценаріями зміни клімату RCP4.5 та RCP8.5

Table 4 – Characteristics of agro-climatic conditions of millet harvest in the Southern Steppe for the base period (1980-2005) and until 2050 according to the climate change scenarios RCP4.5 and RCP8.5

Період, сценарій	Вся суха маса, г/м ² дек			Фотосинтетичний потенціал, м ² /м ² за період	Баланс гумусу, т/га	Урожай проса при вологості 14 %, т/га
	потенційного урожаю	метеорологічно можливого урожаю	дійсно можливого урожаю			
Базовий період 1986-2005	1805	787	480	210,3	0,067	2,19
RCP4.5						
І – й 2021–2030	2096	744	454	247,2	0,064	2,07
ІІ – й 2031–2040	2120	788	481	299,4	0,067	2,19
ІІІ – й 2041–2050	1923	773	472	273,1	0,066	2,15
RCP8.5						
І – й 2021–2030	1954	846	516	277,4	0,072	2,35
ІІ – й 2031–2040	1962	726	443	249,3	0,062	2,02
ІІ І – й 2041–2050	2114	965	528	279,3	0,074	2,41

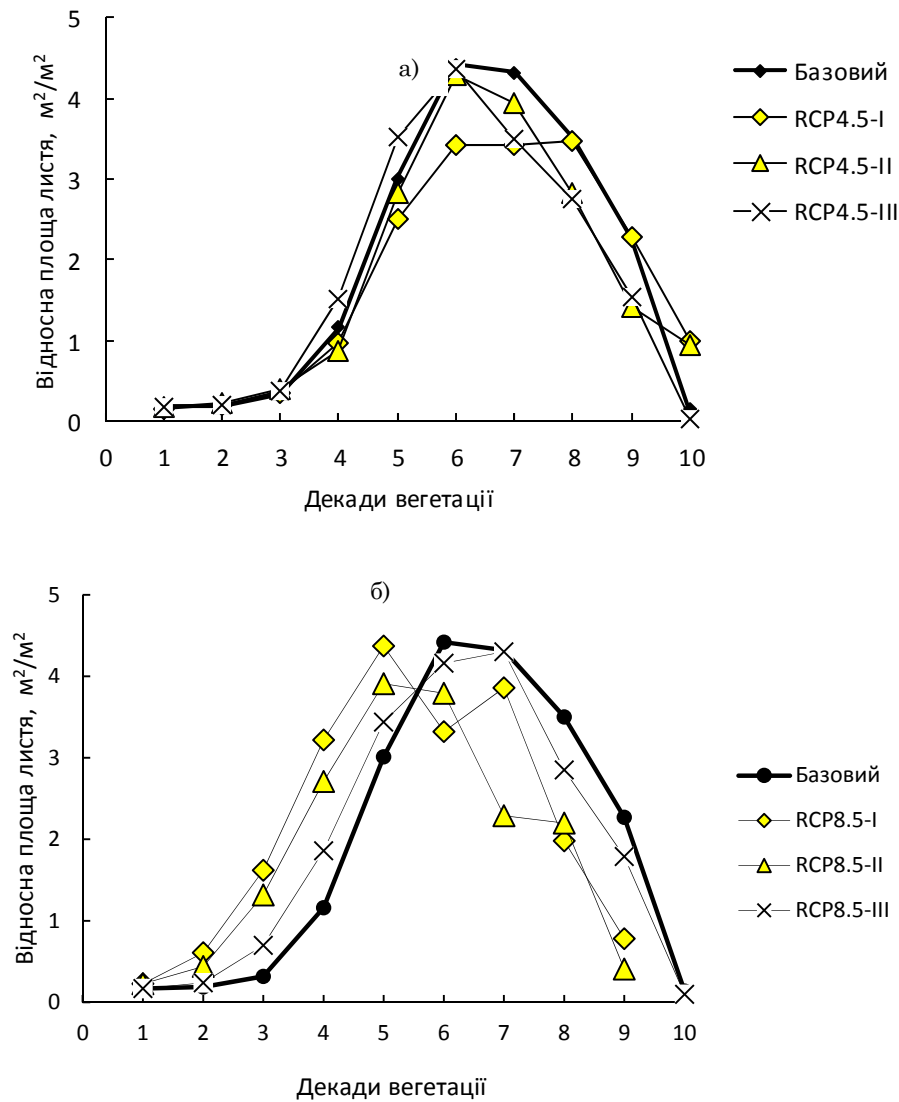


Рис. 2 – Динаміка площі листя проса за вегетаційний період в Південному Степу в базовий період і до 2050 року за сценарієм *RCP4.5* (а) та *RCP8.5* (б)

Fig 2 – Dynamics of millet leaf area during the vegetation period in the Southern Steppe in the base period and until 2050 under the scenario *RCP4.5* (a) and *RCP8.5* (b)

Як і в Північному Степу, площа листкової поверхні впродовж усієї вегетації проса в розрахункові періоди буде меншою, ніж в базовий період (рис. 2а). Так, за сценарієм *RCP4.5* площа листкової поверхні в період максимального розвитку, за базовий період складає $4,42 \text{ м}^2/\text{м}^2$, а в наступні десятиріччя відповідно $3,42$, $4,28$ і $4,36 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Фотосинтетичний потенціал ($\Phi\P$) за умови реалізації сценарію *RCP4.5* за базовий період складає $198,0 \text{ м}^2/\text{м}^2$. В І-й та ІІ-й періоди його величина знизиться до $180,9$ і $182,3 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в ІІ-й період буде ще меншою - $179,1 \text{ м}^2/\text{м}^2$ (табл. 4).

Урожай проса за 14%-й вологості в базовий період $2,19 \text{ т/га}$. В І-й та ІІ-й періоди урожай проса знизиться до $2,07$ і $2,15 \text{ т/га}$, що складатиме 95 та 98% від величини за базовий період. В ІІ-й період урожай проса очікується на рівні величини базового періоду (табл. 4).

При реалізації сценарію *RCP8.5* середня температура повітря в період сходи – повна стиглість в І-й та ІІ-й сценарні періоди складатиме $19,2$ та $19,4^\circ\text{C}$, що вище від температури за базовий період на $0,5$ та $0,7^\circ\text{C}$. В ІІ-й період середня температура повітря буде нижчою на $0,5^\circ\text{C}$ і становитиме $18,2^\circ\text{C}$.

Кількість опадів в І-й та ІІІ-й періоди зменшиться відносно базового періоду на 16 і 36 мм, а в ІІ-й період очікується найменша кількість опадів - 117 мм (на 41 мм менше від базової) (табл. 3).

Сумарне випаровування в І-й та ІІІ-й періоди зменшиться від величини за базовий період на 74 та 79 мм. В ІІ-й період спостерігається найменше сумарне випаровування - 228 мм, що на 115 мм менше від величини за базовий період.

Випаровуваність в І-й та ІІ-й періоди зросте до 875 і 910 мм, що вище від величини в базовий період на 70 і 105 мм. В ІІ-й період, у зв'язку із підвищенням температури, зросте і випаровуваність до 965 мм, що вище, ніж в базовий період на 160 мм.

Вологозабезпеченість посівів проса в І-й та ІІІ-й періоди зменшиться, порівняно із базовим періодом, до 72 та 67%. В ІІ-й період вологозабезпеченість буде найменша - 56% від величини за базовий період (табл. 3).

При реалізації сценарію RCP8.5 за період сходи – повна стиглість спостерігається збільшення ΦAP в порівнянні з величиною за базовий період, але в порівнянні зі сценарієм RCP4.5 - зниження величин в усі розрахункові періоди. Так в І-й та в ІІ-й періоди ΦAP складає 136,5 і 137 кДж/см², що становить 114 та 115% від величини за базовий період. В ІІІ-й період величина ΦAP зменшиться до 124,2 кДж/см² - 104% від величини за базовий період (табл. 3).

Так як, $ПУ$ всієї сухої маси проса залежить від ΦAP , то за сценарієм RCP8.5 також буде спостерігатися ріст $ПУ$. В І-й та ІІ-й періоди $ПУ$ зросте до 1954 та 1962 г/м²дек, тобто до 108 і 109% від величини за базовий період. В ІІІ-й період величина $ПУ$ збільшиться до 2114 г/м²дек - 117% від $ПУ$ за базовий період (табл. 4).

За умови реалізації сценарію RCP8.5 в І-й та ІІІ-й період величина $ММУ$ становить 846 і 865 г/м²дек, що складає 107 та 110% від величини в базовий період. В ІІ-й період очікується зниження $ММУ$ до 726 г/м²дек, що складає 92% від величини в базовий період (табл. 4).

Баланс гумусу під посівами проса складатиме в І-й та ІІІ-й періоду 107 та 110%, а в ІІ-й період знизиться до 93% від середньо багаторічного (табл. 4).

Найбільша величина $ДМУ$, як і $ММУ$, буде відзначається в І-й та ІІІ-й періоди і становитиме 516 та 528 г/м²дек, що становить 108 та 110% від величини за базовий період. В ІІ-й період про-

стежується зниження $ДМУ$ до 443 г/м²дек - 92% від величини за базовий період (табл. 4).

Площа листової поверхні проса, як показник фотосинтетичної продуктивності посівів, в усі розрахункові періоди за сценарієм RCP8.5 буде меншою, ніж в базовий період (рис.26). Так, в І-й та ІІІ-й періоди площа листової поверхні в період максимального розвитку становить 4,37 і 4,30 м²/м² за 4,42 м²/м² в базовий період. В ІІ-й період очікується трохи зменшення площі до 3,91 м²/м².

$\Phi П$ за умовами реалізації сценарію RCP8.5 в базовий період складає 198,0 м²/м². В І-й та ІІ-й $\Phi П$ зросте 204,0 і 199,8 м²/м², а в ІІ-й період - знизиться до 176,4 м²/м² (табл. 4).

За сценарієм RCP8.5 урожай проса за 14%-й вологості в І-й та ІІІ-й періоди буде вищим, а в ІІ-й період нижчим, ніж в базовий період і відповідно будуть складати 2,35, 2,41 і 2,02 т/га, що становить 107, 110 і 92% від величини за базовий період (табл. 4).

5. ВИСНОВКИ

Результати проведених досліджень щодо впливу зміни клімату на фотосинтетичну діяльність посівів проса і формування його врожайності в Степовій зоні України вказують на значну мінливість як агрокліматичних ресурсів, так і зумовлених ними врожайів проса, впродовж 3-х десятирічок (2021-2030, 2031-2040 і 2041-2050 рр.). Виявлено, що загальні закономірності цієї мінливості повторюються для сценаріїв RCP4.5 і RCP8.5, але рівень мінливості більший за сценарієм RCP8.5. Також встановлено, що найбільші зміни будуть відзначатися в період з 2031 до 2040 рр., а в період з 2041 до 2050 року величини показників агрокліматичних ресурсів будуть наближуватися до ресурсів періоду 1986-2005 рр. Відзначається також дещо кращі умови для проса простежуються за обох сценаріїв зміни клімату в Північному Степу, ніж в Південному Степу.

Отримані результати дослідження впливу зміни клімату на агрокліматичні умови формування продуктивності проса для Степової зони України майже цілком відповідають результатам аналогічних досліджень [12-13], Китаю [7], країн Африки та Азії [8-11].

Треба відзначити актуальність подальших до-

сліджень у цьому напрямку із застосуванням інших відомих моделей та сценаріїв зміни клімату.

При цьому, необхідно вказати на загальний низький рівень врожайів сучасних сортів проса, що вказує на актуальність введення у виробництво нових, більш врожайних сортів та агрокліматичного обґрунтування сучасних технологій його вирощування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Польовий А. М. Оцінка впливу змін клімату на зміни агрокліматичних ресурсів Луганського регіону, умови росту та продуктивність сільськогосподарських культур і природної рослинності: звіт. / МБО «Інститут розвитку територіальних громад», 2012. С. 58.
2. Івані Жування. Підвищення стійкості до зміни клімату сільськогосподарського сектору Півдня України / Регіональний Екологічний Центр для Центральної та Східної Європи. Сентендре: Угорщина. Жовтень, 2015. С. 5-7.
3. Greenhouse gases emission from soils under major crops in northwest India / Jain N. et al. *Sci. Total Environ.* 2016. 542. Pp. 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.073>.
4. Jain R., Bal S. Properties of pearl millet. *J. Agric. Eng. Res.* 1997. 66. Pp. 85–91. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0119>.
5. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. / Yao F. et al. *Field Crops Res.* 2012. 126. Pp. 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.018>.
6. Effect of Climate Change on the Yield of Cereal Crops: A Review / Jin Wang et al. *Climate.* 2018. 6(2). P.41. <https://doi.org/10.3390/cli6020041>.
7. A case study of climate-smart management in foxtail millet (*Setaria italica*) production under future climate change in Lishu county of Jilin, China / Tao Liu et al. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2020. 15. Pp. 292–293. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108131>.
8. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa / Sultan B. et al. *Environment Research Letters.* 2013. 8. Pp. 9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014040>.
9. Exploring Potential of Pearl Millet Germplasm Association Panel for Association Mapping of Drought Tolerance Traits / Sehgal D. et al. *PLoS ONE.* 2015. 10(5): e0122165. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122165>.
10. Assessing climate change impacts on pearl millet under arid and semi-arid environments using CSM-CERES-Millet model / Ullah A. et al. *Environ Sci Pollut Res.* 2019. 26. Pp. 6745–6757. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3925-7>.
11. An assessment of yield gains under climate change due to genetic modification of pearl millet / Piara Singh et al. *Science of The Total Environment.* 2017. 1. Pp. 1226–1237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.002>.
12. Данілова Н. В. Оцінка зміни агрокліматичних умов вирощування проса в південних областях України в зв'язку зі зміною клімату. *Український гідрометеорологічний журнал.* 2016. Вип. 17. С. 93–101. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.11>

13. Аверчев О. В. Адаптивність сортів проса до ґрунтових особливостей Причорноморського степу України. *Вісник Уманського національного університету садівництва.* 2014. Вип. 2. С. 75–79.
14. Агрокліматичний довідник по території України / за ред. Т. І. Адаменко, М. І. Кульбіді, А. Л. Прокопенко. Кам'янець-Подільський, 2011. 107 с.
15. The impact of emission and climate change on ozone in the United States under representative concentration pathways (RCPs) / Gao Y. et al. *Atmos. Chem. Phys.* 2013. 13. Pp. 607–621. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9607-2013>.
16. Польовий А. М. Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агроєкосистем: Київ: КНТ, 2007. 344 с.

REFERENCES

1. Pol'ovyi, A.M. (2012). *Otsinka vplyvu zmin klimatu na zminy ahroklimatychnykh resursiv Luhans'koho rehionu, umovy rostu ta produktyvnist' sil'skohospodars'kykh kul'tur i pryrodnoyi roslinnosti. [Assessing the impact of climate change on changes in agro-climatic resources of Lugansk region, the conditions of growth and productivity of crops and natural vegetation]*. IBO "Institute for the Development of Territorial Communities". (in Ukr.)
2. Ivani, Zhuzhanna. (2012). *Pidvyshchennya stiykosti do zminy klimatu sil'skohospodars'koho sektoru Pivdnia Ukrainy [Increased resistance to climate change agricultural sector of the South Ukraine]*. Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe. Sentendre, Uhorshchyna. October. Pp. 5-7. (in Ukr.)
3. Jain, N. et al. (2016). Greenhouse gases emission from soils under major crops in northwest India. *Sci. Total Environ.* 542, pp. 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.073>.
4. Jain, R., Bal, S. (1997). Properties of pearl millet. *J. Agric. Eng. Res.* 66, pp 85–91. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0119>
5. Yao, F. et al. (2012). Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Res.* 126, pp. 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.018>.
6. Jin, Wang et al. (2018). Effect of Climate Change on the Yield of Cereal Crops: A Review. *Climate*, 6(2), p. 41. <https://doi.org/10.3390/cli6020041>.
7. Tao, Liu et al. (2020). A case study of climate-smart management in foxtail millet (*Setaria italica*) production under future climate change in Lishu county of Jilin, China. *Agricultural and Forest Meteorology.* 15, pp. 292–293. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108131>.
8. Sultan, B. et al. (2013). Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environment Research Letters*, 8, p. 9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014040>.
9. Sehgal, D. et al. (2015). Exploring Potential of Pearl Millet Germplasm Association Panel for Association Mapping of Drought Tolerance Traits. *PLoS ONE*, 10(5): e0122165. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122165>.
10. Ullah, A. et al. (2019). Assessing climate change impacts on pearl millet under arid and semi-arid environments using CSM-CERES-Millet model. *Environ Sci Pollut Res.* 26, pp. 6745–6757. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3925-7>.
11. Piara, Singh et al. (2017). An assessment of yield gains under climate change due to genetic modification of pearl millet. *Science of The Total Environment*, 1, pp. 1226–1237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.002>.

12. Danilova, N.V. (2016). [Assessment of changes in agro-climatic conditions of millet cultivation in the southern regions of Ukraine due to climate change]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal* [Ukrainian hydrometeorological journal], 17, pp. 93-101. (in Ukr.). <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.11>
13. Averchev, O.V. (2014). [Adaptability of millet varieties to soil features of the Black Sea steppe of Ukraine]. *Visnyk Umans'kogo nacional'nogo universytetu sadivny'ctva*. [Bulletin of Uman National University of Horticulture], 2, pp.75-79. (in Ukr.).
14. Adamenko, T.I., Kulbida, M.I. & Prokopenko, A.L. (eds). (2011). *Ahroklimatychnyi dovidnyk po terytorii Ukrainy* [Agroclimatic reference book for territories of Ukraine]. Kamianets-Podilsk. (in Ukr.).
15. Gao, Y. et al. (2013). The impact of emission and climate change on ozone in the United States under representative concentration pathways (RCPs). *Atmos. Chem. Phys.* 13, pp. 607-621. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9607-2013>.
16. Pol'ovyi A.M. (2007). *Modelyuvannya hidrometeorologichnogo rezhymu ta produktyvnosti ahroekosystem* [Modeling of hydrometeorological regimes and agro-ecosystems' productivity]. Kyiv: KNT (in Ukr.).

TENDENCY FOR CHANGE OF AGROCLIMATIC CONDITIONS FOR FORMATION OF MILLET YIELD BY 2050 WITHIN THE STEPPE ZONE OF UKRAINE

H. V. Lyashenko, N. V. Danilova, V. V. Kolosovska, A. V. Tolmachova

Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine,
lgv53@ukr.net, nataliadanilova0212@gmail.com,
kolosv@ukr.net, alla.tolmach@ukr.net

The current trend of climate change requires a significant revision of the species and breed composition of agricultural crops. Preference should be given to drought-resistant crops such as millet, especially in the Steppe zone of Ukraine. Thus studies of agro-climatic conditions for formation of millet yields in the coming years are of great importance. The article covers the assessment of changes in agro-climatic resources for the Northern and Southern Steppe zones of Ukraine according to RCP4.5 and RCP8.5 scenarios during three ten-year periods: 2021-2030, 2031-2040 and 2041-2050 as compared with the basic period of 1986-2005. The research applies the basic model for assessment of agro-climatic resources of formation of agricultural crops productivity developed by A. M. Polevoy. The model uses meteorological and agrometeorological data of air temperature and humidity, precipitation, solar radiation, water-physical properties and soil moisture obtained through standard meteorological and agrometeorological observations. The model of crops production process allowed establishing the agro-climatic resources during millet vegetation season and indicators of photosynthetic productivity, as well as determining the regularities for formation of different agri-environmental categories of crop yield and crop yield fluctuations under climate change within the thirty-year period from 2021 to 2050. The research evaluates the change of aforementioned indicators both in the context of individual periods and in the context of the Northern and Southern Steppe zones. It was found that the largest change in agro-climatic resources and millet productivity is observed in the Southern Steppe zone. For both the Southern and Northern Steppe zones the largest difference of such indicators is observed under the RCP8.5 climate change scenario. It was also found that the largest change of the indicators is observed within the period from 2031 to 2040. However, within the next decade, the values of all indicators will be close to the data observed during the basic period (1986-2005). According to the results of calculations for the period from 2021 to 2050 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios the expected scenario yields will be higher than those of the basic period.

Key words: climate change; millet; agro-climatic resources; indicators of photosynthetic productivity; agri-environmental categories of crops; Steppe zone of Ukraine.

Подання до редакції : 06. 06. 2022

Надходження остаточної версії : 28. 06. 2022

Публікація статті : 07. 07. 2022

УДК 551.582 + 551.468

ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА ВОДНИЙ БАЛАНС КВАЗІЗАКРИТИХ ЛИМАНІВ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я

Ю. С. Тучковенко, В. М. Хохлов, Н. С. Лобода

*Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, tuch2001@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

В статті досліджується вплив регіональних змін клімату, які вже відбулися та очікуються у найближчому майбутньому, на складові річного прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Ці лимани на теперішній час не мають постійного зв'язку з морем, а лише епізодично з'єднуються з ним штучно створеними каналами, протоками або іншими водопровідними гідротехнічними спорудами. Як показник чутливості екосистем таких лиманів до змін клімату використовується величина дефіциту їхнього річного прісного водного балансу. Ті з лиманів, які найбільш чутливі до зміни регіональних кліматичних умов, потребують розробки та реалізації планів дій для досягнення та підтримання їхнього "доброго" екологічного стану в першу чергу.

Отримані оцінки кліматичних змін середньобаторічних значень метеорологічних характеристик в північно-західному Причорномор'ї, які визначають складові водного балансу лиманів, для сучасного періоду 2000-2018 рр. (за даними спостережень на прибережних метеорологічних станціях) та майбутнього 2021-2050 рр., порівняно з періодом 1961-1990 рр. (за даними Кліматичного кадастру України). Очікувані кліматичні умови у найближчому майбутньому (2021-2050 рр.) визначались за результатами проекту Euro-CORDEX для сценарію змін клімату RCP4.5.

Для кожного з вказаних періодів оцінені складові прісного водного балансу лиманів (атмосферні опади, що випадають на водну поверхню лиманів, приплив прісних вод з водозбору, випаровування з водної поверхні лиманів) та визначені нев'язки (дефіцит) річного балансу. Для визначення припливу прісних вод до лиманів з водотоками їх водозбірного басейну, за метеорологічних умов різних кліматичних періодів, використовувалась гідрологічна модель «клімат-стік». Оцінка річного шару випаровування з водної поверхні лиманів виконувалась на підставі даних про багаторічні середні місячні значення температури та відносної вологості повітря у вказані періоди.

Встановлено, що зміни кліматичних умов, які вже відбулись та очікуються у XXI ст., викликають збільшення дефіциту річного прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Для окремих лиманів такі зміни створюють загрозу їхнього обміління і засолення або, навіть, зникнення. Це потребує розробки нових стратегій водного та екологічного менеджменту квазізакритих лиманів. За вразливістю до змін клімату через виникнення значного річного дефіциту прісного водного балансу, у разі відсутності інших джерел надходження вод (наприклад, з моря), лимани були ранжовані у такій послідовності: Куяльницький, Дофінівський, Будацький (за відсутності надходження вод з Дністровського лиману), Тузлівська група, Сасик, Тилігульський, Хаджибейський (за відсутності надходження до нього зворотних вод).

Ключові слова: північно-західне Причорномор'я; квазізакриті лимани; зміни клімату; прісний водний баланс; дефіцит

1. ВСТУП

На ділянці узбережжя північно-західної частини Чорного моря в межах річки Дунаю і Дніпра розташовані 17 основних лиманів (рис. 1). Їх можна розділити на дві групи: відкриті, із вільним водообміном з відкритим морем, та умовно названі нами «квазізакритими». До другої групи лиманів віднесені істотно ізольовані від моря

лимани, які епізодично з'єднуються з морем штучно створеними каналами, протоками або іншими водопровідними гідротехнічними спорудами. В цій групі об'єднані «закритий» та «періодично закритий» («напівзакритий», «епізодично з'єднаний з морем») типи лиманів у традиційній їх класифікації [1-3].



Рис. 1 – Лимани північно-західної частини Чорного моря: 1 – Сасик; 2 – Джантшейський; 3 – Малий Сасик; 4 – Шагани; 5 – Алібей; 6 – Бурнас; 7 – Будацький; 8 – Дністровський; 9 – Сухий; 10 – Хаджибейський; 11 – Куяльницький; 12 – Дофінівський; 13 – Григорівський; 14 – Тилігульський; 15 – Тузли; 16 – Березанський; 17 – Дніпровсько-Бузький

Fig. 1 – Lagoons in the North-Western Black Sea coast: 1 – the Sasyk; 2 – the Dzhantsheyskiy Liman; 3 – the Malyi Sasyk; 4 – the Shagany; 5 – the Alibei; 6 – the Burnas; 7 – Budatskiy Liman; 8 – Dnistrovskiy Liman; 9 – Suhyy Liman; 10 – Hadzhibeyskiy Liman; 11 – Kuialnytskyi Liman; 12 – Dofinivskiy Liman; 13 – Grygorivskiy Liman; 14 – Tyligulskiy Liman; 15 – the Tuzly; 16 – Berezanskiy Liman; 17 – Dniprovsko-Bugskiy Liman

До групи квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я, які розглядаються в цій статті, належать: Сасик (перетворений у водосховище, але у теперішній час запланований до ренатуралізації), Тузлівська група (Шагани, Алібей, Бурнас), Будацький (Шаболатський), Хаджибейський, Куяльницький, Дофінівський (Великий Аджалицький), Тилігульський. Ці лимани в теперішній час не мають усталеного зв'язку з морем і відокремлені від нього піщано-черепашковими перешийками (пересипами) шириною від кількох сотень метрів до 4 км. Раніше в цих пересипах могли періодично утворюватися природні прорви (промоїни). Однак, внаслідок антропогенного перетворення території більшості пересипів, цей процес в теперішній час практично припинився, за винятком поодиноких випадків.

За генезисом квазізакриті лимани поділяються на морські затоки (лагуни), відокремлені від моря пересипами (наприклад, Будацький, Тузлівська група лиманів) та на затоплені морем

гирлові області річок, які у теперішній час втратили природний зв'язок з морем і також відокремлені від нього пересипами різної ширини, в тілі яких споруджені штучні з'єднувальні гідротехнічні споруди, які функціонують епізодично (Хаджибейський, Куяльницький, Дофінівський, Тилігульський лимани) [2, 3].

В останні десятиріччя, починаючи з кінця 80-х років XX ст., на території України спостерігаються істотні зміни клімату та водних ресурсів [4]. На узбережжі північно-західної частини Чорного моря ці зміни характеризуються зростанням посушливості клімату та відповідним зменшенням припливу прісних вод до прибережних лиманів з їхніх водозбірних басейнів [5, 6].

Найбільш чутливими та вразливими до змін клімату є екосистеми квазізакритих лиманів, оскільки через зростання температури повітря і, як наслідок, збільшення випаровування з одночасним зменшенням надходження прісних вод з водозбору, в лиманах цього типу формується

значний дефіцит річного прісного балансу. Якщо цей дефіцит не компенсувати, то виникає багаторічна тенденція до зменшення об'ємів вод у лиманах, їхнього обміління і, як наслідок, до зростання солоності та погіршення якості вод (зростання концентрації біогенних та забруднювальних речовин, погіршення кисневого режиму та ін.) для традиційних видів природокористування [7].

Мета роботи полягає в отриманні кількісних оцінок впливу змін регіонального клімату, що відбулися у недалекому минулому та очікуються у найближчому майбутньому, на прісний водний баланс квазізакритих морських лиманів північно-західного Причорномор'я, які у теперішній час не мають постійного зв'язку з морем і епізодично з'єднуються з ним штучно створеними відкритими каналами або іншими водопровідними гідротехнічними спорудами.

Актуальність отримання таких оцінок полягає в тому, що при визначенні стратегії реалізації природоохоронних заходів, які повинні бути передбачені у планах водного та екологічного менеджменту окремо для кожного з квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я, необхідно враховувати ті зміни у формуванні їхнього гідрологічного та гідроекологічного режимів, які вже відбуваються та очікуються у найближчому майбутньому внаслідок зміни регіональних кліматичних умов.

В останні десятиріччя багатьма зарубіжними дослідниками приділяється велика увага визначенню впливу змін клімату на екосистеми прибережних лагун [8-10] через їх чутливість і вразливість до цих змін. Оскільки взаємодія між локальними антропогенними стресовими чинниками та регіональними змінами клімату є дуже складною, підкреслюється необхідність отримання оцінок їхнього сукупного впливу на гідрологічні та екологічні характеристики лагун, а також оцінок ефективності різних стратегій водного та екологічного менеджменту стосовно кожної конкретної лагуни. Проблеми менеджменту лагун в умовах змін клімату розглядаються в роботах [10-13]. В роботі [14] запропоновано індекс природної стійкості лиманів північно-західного Причорномор'я, який розраховується на основі їхніх гідролого-морфометричних характеристик. За цим індексом було виконано ранжування лиманів. Однак він не враховує вплив зміни кліматичних умов на складові водного балансу лиманів і таким чином не визначає їхню вразливість до змін клімату.

Робота ґрунтується на гіпотезі, що зміни регіонального клімату призводять до виникнення та

посилення в останні десятиліття дефіциту річного прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Величина цього дефіциту для кожного з досліджуваних лиманів, виражена у відсотках від середньорічного об'єму його вод, розглядається як показник вразливості лиману до змін клімату.

2. ГІДРОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНИХ ЛИМАНІВ

Тилігульський лиман (46° 39,3' – 47° 05,3' пн.ш., 30°57,3' – 31 °12,7' сх.д.) являє собою затоплену морськими водами долину річки Тилігул. Він витягнутий майже меридіонально з північно-північного-заходу на південно-південний-схід. Його довжина становить ≈ 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. Південна і центральна частини лиману є улоговинами з переважаючими глибинами в діапазоні 10-16 м, які розділені мілководною перемишкою. Максимальна глибина в південній частині лиману сягає 22,2 м. Північна частина лиману, в яку впадає річка Тилігул, мілководна, з глибинами менше 4 м.

Наприкінці 50-х років ХХ сторіччя в рибогосподарських цілях у пересипі Тилігульського лиману був побудований і введений в експлуатацію штучний канал, 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 було спрямовано на вирішення задачі регулювання водного балансу лиману з метою стабілізації рівня води в ньому.

За минулі роки південна частина каналу, що примикає до моря, дуже обміліла внаслідок перенесення піску з боку моря. У 2012-2015 рр. глибини тут становили лише кілька десятків сантиметрів. У ХХІ ст. канал функціонував нерегулярно, протягом 25-40 діб навесні та восени, після розчищення перших сотень метрів морської частини каналу від піщаних наносів. Тому у 2016 р. була розпочата реконструкція з'єднувального каналу, яка дотепер не закінчилася остаточно.

Площа водозбірної басейну Тилігульського лиману становить 5420 км². У лиман впадають річки: Тилігул (площа водозбору 3550 км², довжина 173 км), Балайчук (площа водозбору

586 км², довжина 52 км), Царега (площа водозбору 657 км², довжина 46 км), Хуторська (площа водозбору 108 км², довжина 19 км). Поверхневий бічний приплив прісних вод по тимчасових водотоках (балках, ярах), які впадають в лиман, формується на площі 349 км². Основна частина стоку в Тилігульський лиман (більше 85 %) надходить від річки Тилігул [5].

Куяльницький лиман (46° 33,6' – 46° 48' пн. ш., 30° 34,8' – 30° 46,2' сх. д.) розташований в 2 км на північний захід від північного узбережжя Одеської затоки та є одним з найдавніших закритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Лиман являє собою продовження долини річки Великий Куяльник. Загальна площа водозбору Куяльницького лиману становить 2250 км². Історично, основним джерелом живлення лиману прісною водою була річка Великий Куяльник, площа водозбору якої, при довжині річки в 150 км, становить 1860 км² (82,7% загальної водозбірної площі лиману). Окрім неї, вода може надходити до лиману через водотоки його східного берегу (малі річки Довбока, Кубанка, балки Гільдендорфська, Корсунцівська) [6].

Внаслідок господарських перетворень на водозбірному басейні лиману та зміни кліматичних умов, у період 2003-2014 рр. відбулося зменшення його протяжності з 26 до 15,3 км, площі водного дзеркала з 52 до 26,7 км², об'єму вод – з 68 до 11 млн. м³; солоність ропи збільшилася зі 108 до 300 ‰ [6]. Для запобігання повному висиханню лиману наприкінці 2014 р. було розпочате поповнення Куяльницького лиману морською водою з Одеської затоки за допомогою спеціально прокладеного самопливного трубопроводу. Поповнення здійснюється в грудні-квітні кожного року, коли температура морської води менша за 8°C.

Середньорічна відмітка рівня води в лимані у 2014 р. становила -6,62 м БС. В період 2015-2021 рр. вона підвищилась до мінус 6,17 м БС у 2018 р., а потім, через вкрай посушливі 2019-2020 рр., знизилась до мінус 6,49 м БС у 2020 р. Відповідно до коливань рівня води в лимані, об'єм його вод змінювався від 29,7 млн. м³ у 2018 р. до 16,85 млн. м³ у 2020 р., а площа водної поверхні – від 45,52 км² до 34,18 км², відповідно.

Максимальна глибина в лимані, визначена за результатами польових досліджень влітку 2009 р., становила 1,8 м при позначці рівня мінус 6,42 м БС [6].

Хаджибейський лиман є непроточною закритою водоймою, яка утворилась в результаті затоплення морем гирлової частини долини річ-

ки Малий Куяльник, з подальшим відділенням її від моря піщаним пересипом. Від моря лиман відділений пересипом шириною 4,5 км і довжиною 5 км. Довжина лиману становить 40 км, ширина – 0,5-3,5 км. Площа водозбірного басейну лиману становить 2,7 тис. км². В лиман впадають річки Малий Куяльник (площа водозбору 1540 км², довжина 118 км) та Свинна (площа водозбору 772 км², довжина 54,1 км) [15].

Систематичні спостереження за стоком річок не виконуються, але відомо, що він дуже зарегульований. Наприкінці 90-х років минулого століття загальна кількість ставків і водосховищ, які регулювали стік р. М. Куяльник, становила 21 шт. з сумарним об'ємом 7,72 млн. м³, а в басейні р. Свинна – 9 шт. з сумарним об'ємом 7,02 млн. м³. У сучасних умовах стік р. Свинна майже повністю затримується штучними водоймами, розташованими на її гирловій ділянці [15].

Антропогенними чинниками, які значною мірою визначають мінливість рівня води в лимані, є надходження зворотних частково очищених стічних вод м. Одеси зі станції біологічного очищення (СБО) «Північна» (56,4 млн. м³/рік), а також дренажних вод з полів зрошення від насосних станцій ДНС № 4, ДНС № 5 та з каналізаційних очисних споруд «НАТІ» (с. Нерубайське Біляївського району) – сумарно 20,2 млн. м³/рік [15].

Наприкінці 60-х років ХХ ст. був введений в експлуатацію гідротехнічний вузол для скидання лиманних вод у море у складі головного шлюзу, насосної станції потужністю 7.0 м³/с із напірним трубопроводом і водовипуском до моря. Однак в останні роки він не функціонує і актуальним є питання відновлення можливості аварійного самопливного скиду води з лиману до моря (у разі підвищення відмітки рівня води в лимані до критичних значень) через реконструйовані канали.

Дофінівський лиман утворився в результаті трансгресії моря в долину річки Великий Аджалик. В теперішній час річка, довжина якої раніше досягала 25-30 км, практично припинила своє існування. Площа водозбору басейну Дофінівського лиману з урахуванням басейну річки Великий Аджалик і Чорної балки приблизно дорівнює 110 км², з них площа водозбору власне лиману – 50 км². Прісна вода може надходити до лиману з системи ставків, розташованих на території с. Олександрівка, в обсягах 200-300 м³/доб, а також переливатися через дамбу, яка відділяє лиман від Олександрівського ставка, коли він переповнюється [16]. В роботі [17]

річний об'єм поверхневого стоку 50% забезпеченості в лиман оцінюється в 1,8 млн.м³, а в [16] – в 3,03 млн.м³; в маловодний рік 95% забезпеченості – 1,36 млн.м³.

З 1998 р. епізодичний зв'язок лиману з морем підтримується штучно через трубопровід довжиною 250 м з діаметром труби 920 мм, яка виходить в море на глибину 3 м. Довжина морської частини трубопроводу становить 200 м.

Будацький (Шаболатський) лиман, відмежований від моря вузьким пересипом шириною 80-200 метрів, має загальну довжину 17 км, середню ширину – 1,5 км, максимальну ширину – 2,5 км. Середня глибина лиману становить 1,05 м, максимальна – досягає 2,25 м. З врахуванням плавнів у східній частині лиману, загальна площа його водної поверхні становить 31,5 км², а об'єм вод – 30,0 млн.м³ [2, 18]. Водозбірна площа лиману становить 156 км².

У теперішній час Будацький і Дністровський лимани з'єднані двома каналами, які залишаються відкритими протягом усього року. Навесні і восени лиман з'єднується з Чорним морем каналом, розташованим в південно-західній частині пересипу поблизу села Приморське (Будаки). Невеличкі обсяги прісного стоку можуть надходити до лиману через балки (Аккембетську і поблизу с.Приморське). Морська вода надходить в лиман навесні і восени через морський канал, а в період сильних нагінних вітрів – з Дністровського лиману через Бугазькі канали [19].

Тузлівська група лиманів утворилися в результаті затоплення морем низьких ділянок суші з подальшим відокремленням від моря піщаним пересипом – баром. У складі Тузлівської групи лиманів виділяють 3 основних («первинних») лимани: Шагани, Бурнас, Алібей, – та ряд «вторинних» лиманів [20]. Лимани Шагани, Бурнас і Алібей сполучені між собою широкими протоками і відокремлені від моря однією загальною косою-пересипом, тому розглядаються як єдиний лиманний комплекс. Довжина пересипу, що відокремлює лимани від моря, приблизно 29 км, ширина – від 60 до 400 м.

Стан природних ресурсів Тузлівської групи лиманів та їх використання визначаються наявністю зв'язку з морем через природні «прорви» (промоїни), які можуть створюватись в косі-пересипу під дією штормів, або через штучно створені канали. З 1953 по 1990 рр. в косі постійно діяли від 2 до 5 таких каналів, що забезпечувало стабільний та сприятливий для рибогосподарської діяльності гідролого-гідрохімічний режим.

В період 2010-2015 рр. водойма з'єднувалась з морем широкою та глибокою прорвою-промоїною, яка утворилась в результаті розмиву спочатку невеликого, штучно створеного каналу на 24 км коси-пересипу (л.Шагани). У 2015 р. прорва на 24-му км коси-пересипу була штучно перекрита. З цього часу зв'язок водойми з морем підтримувався через створений на 2-му кілометрі коси-пересипу (л. Бурнас) штучний обловно-запускний канал з проектною шириною 15,0 м і відміткою дна мінус 1,0 м БС, який функціонував декілька місяців навесні і восени.

Площа водозбору Тузлівської групи лиманів становить 2231 км². Основними водотоками, які періодично живлять лимани прісною водою є: річка Хаджидер (оз.Хаджидер-л.Алібей) – з площею водозбору 894 км²; річка Алкалія (оз.Солоне-л.Бурнас) – 443 км².

Історично **водосховище Сасик** сформувалося як водоймище естуарно-лиманного типу з природним водообміном з прилеглою частиною Чорного моря (Жебріянською бухтою) через прорви, які періодично утворювались в піщаному пересипі, що відокремлює водойму від моря.

В 1978 р., в рамках побудови першої черги Дунай-Дніпровської зрошувальної системи, лиман Сасик був відокремлений від моря, шляхом розширення 15-кілометрового пересипу та укріплення його бетонними елементами, а сам лиман був поєднаний з річкою Дунай шлюзованим каналом.

Проте основні цілі проекту – покращення питного та промислового водопостачання, доведення до нормативних вимог якості вод, що використовуються для зрошення, – не були досягнуті. Головною причиною була незадовільна якість вод водосховища Сасик. В цілому стан екосистеми водосховища у теперішній час можна охарактеризувати як напружений і нестабільний, тобто як стан екосистеми штучної водойми, яка має обмежені можливості для саморегулювання і залежить головним чином від зовнішнього фактору.

В північну частину лиману може надходити стік 2-х річок – Когильник та Сарата. Сарата має довжину 120 км, площу водозбору 1250 км². Річище її частково розчищене і спрямлене. Шляхом регулювання річкового стоку шлюзами, вода використовується для промислового й сільськогосподарського водопостачання та зрошення. Когильник має довжину 243 км, площу водозбірної басейну – 3910 км² [21, 22].

3. МЕТОДИ І МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Природний прісний водний баланс лиманів визначається співвідношенням основних прибуткових та витратних його складових. До перших належать: атмосферні опади на водне дзеркало водойми та надходження вод з водозбірних басейнів лиману зі стоком річок та інших водотоків. До других – випаровування з водної поверхні лиману. Підземне живлення лиманів не враховувалось, оскільки в умовах посушливого клімату північно-західного Причорномор'я воно, навіть до початку кліматичних змін, за оцінками [23] становило менше 10% від інших вищевказаних і добре вивчених прибуткових складових водного балансу лиманів, тобто знаходилося в межах точності розрахунків водного балансу. Отже рівняння річного прісного балансу суто закритого лиману може бути записано в такий спосіб

$$\delta W = W_P + W_R - W_E, \quad (1)$$

де δW – нев'язка (дефіцит або профіцит) річного прісного водного балансу, млн.м³; W_P – об'єм атмосферних опадів, що випали на водну поверхню лиману, млн.м³, за рік; W_R – об'єм припливу води по водотоках з водозбірних басейнів до лиману, млн.м³, за рік; W_E – об'єм води, що випарився з водної поверхні лиману за рік, млн.м³.

У разі додатного значення δW рівень води в лимані буде підвищуватись, а від'ємного – знижуватись.

Регулювання рівня води в лиманах на багаторічному часовому масштабі можливе шляхом встановлення природного (через природні прорви-промоїни у пересипу) або штучного (через штучно створені з'єднувальні канали, трубопроводи) їхнього водообміну з морем. З урахуванням цього, рівняння водного балансу лиману з'єданого з морем набуває такого вигляду:

$$W_P + W_R - W_E + \delta W_{SEA} = 0, \quad (2)$$

де $\delta W_{SEA} = W_{S-L}^+ - W_{S-L}^-$ – різниця між об'ємами води, яка вийшла з лиману до моря W_{S-L}^+ та надійшла з моря до лиману W_{S-L}^- через прорву або канал(и), трубопроводи протягом року.

Складові прісного водного балансу W_P і W_E у рівнянні (1) істотним чином, а W_R – опоряд-

ковано, від таких метеорологічних характеристик клімату північно-західного Причорномор'я, як опади, температура та відносна вологість повітря.

Для розрахунку складових водного балансу лиманів у сучасний період використовувались дані середніх місячних значень температури, відносної вологості повітря і місячних сум атмосферних опадів за 19-річний період (з 2000 по 2018 роки) отримані на 4 метеорологічних станціях (Сарата, Одеса, Сербка, Очаків) розташованих у зазначеному регіоні. Додатково залучались дані щодо середніх місячних значень температури повітря і місячних сум атмосферних опадів на прибережних гідрометеорологічних станціях «порт Південний» та «Білгород-Дністровський».

Порівняльний аналіз здійснювався з аналогічними даними Кліматичного кадастру України, розрахованими за 1961–1990 роки (далі – Кадастр) [24]. Цей період надалі будемо звати базовим. Зауважимо, що оскільки за свідченням [4, 25] початок суттєвих змін клімату і водних ресурсів в Україні припадає саме на кінець 1980-х років, то метеорологічні і гідрологічні характеристики в період 1961–1990 рр. дійсно є посиляльними для визначення як зміни кліматичних умов, так і їх наслідків.

Очікувані кліматичні умови у найближчому майбутньому (2021–2050 рр.) визначались за результатами проекту Euro-CORDEX [26] для сценарію змін клімату RCP4.5 [27]. З ансамблю 14 симуляцій за різними регіональними кліматичними моделями була обрана одна – отримана за регіональною моделлю CLMcom-CCLM4-8-17 у поєднанні з глобальною моделлю MPI-ESM-LR, позначена в цілому як CLMcom4, яка якнайкраще відповідає середнім за ансамблем симуляцій значенням [26]. За даними цієї модельної симуляції були отримані оцінки очікуваних у найближчому майбутньому багаторічних середньомісячних значень приземної температури повітря, питомої вологості повітря та місячних сум атмосферних опадів. В обраних розрахункових вузлах модельної сітки, розташованих на узбережжі північно-західного Причорномор'я поблизу досліджуваних лиманів, для вказаних метеорологічних параметрів визначалась типова для періоду 2021–2050 років внутрішньорічна мінливість їхніх середніх місячних значень.

Оцінка річного шару випаровування з водної поверхні лиманів в першому наближенні здійснювалась із використанням розрахункової формули [28] за даними про багаторічні середні місячні значення температури та відносної вологості повітря:

$$E = 0,0018(25 + T_a)^2(100 - R), \quad (3)$$

де E – шар випаровування (мм/міс); T_a – багаторічна середньомісячна температура повітря (°C); R – багаторічне значення середньомісячної відносної вологості повітря (%).

Оскільки дані спостережень за стоком річок і водотоків, які живлять досліджувані квазізакриті лимани, взагалі відсутні або недостатні для достовірної кількісної оцінки його змін внаслідок спільного впливу природних та антропогенних чинників, то для визначення припливу прісних вод до лиманів за метеорологічних умов різних кліматичних періодів використовувалась модель «клімат-стік» [29]. Модель дозволяє отримувати оцінки характеристик природного та побутового (перетвореного водогосподарською діяльністю) річкового стоку, на базі метеорологічної інформації та відомостей про показники господарського використання стоку, і містить у собі ланцюг розрахункових блоків “клімат – кліматичний (зональний) стік – підстильна поверхня – природний стік – водогосподарська діяльність – побутовий стік”. Розрахунок річних об’ємів стоку річок в період до початку кліматичних змін (1961-1990 рр.) та у сучасний кліматичний період (2000-2018 рр.) виконувався за даними спостережень на 6 метеорологічних станціях межиріччя Дністер – Південний Буг (Любашівка, Одеса, Роздільна, Сербка, Затишшя, Вознесенськ) та 8 станціях межиріччя Дунай – Дністер (Ізмаїл, Сарата, Білгород-Дністровський, Дубосари, Комрат, Леово, Болград, Чадир-Лунга) [30], а для майбутнього періоду 2021-2050 рр. – за метеорологічними даними середньостатистичної модельної траєкторії змін клімату за сцена-

рієм RCP4.5, отриманими осередненням результатів моделювання за ансамблем з 14 симуляцій різними регіональними кліматичними моделями проекту Euro-CORDEX.

Морфометричні характеристики досліджуваних квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор’я, що використовувались для оцінки змін складових їхнього річного прісного водного балансу та величин його нев’язки, наведені в табл. 1. Площі водного дзеркала лиманів були актуалізовані до умов 2020 р. за даними супутникових знімків із використанням інструментів Google Earth, а об’єми води оцінені через доступні відомості про середню глибину водойм. Внутрішньорічні зміни об’єму води в лиманах та площі їх водної поверхні не враховувались.

Як показники вразливості лиманів північно-західного Причорномор’я до змін клімату використовувались виражені у відсотках співвідношення:

➤ між дефіцитом річного прісного водного балансу і загальним середнім багаторічним об’ємом вод в кожному з лиманів:

$$I_{PRE} = \frac{(W_P + W_R - W_E) \times 100\%}{W}; \quad (4)$$

➤ різницею річних об’ємів атмосферних опадів та випаровування з водної поверхні лиманів (при незмінній середній багаторічній її площі) і загальним середнім багаторічним об’ємом води в кожному з лиманів:

$$I_{PE} = \frac{(W_P - W_E) \times 100\%}{W}. \quad (5)$$

Таблиця 1 – Морфометричні характеристики досліджуваних квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор’я прийняті для розрахунків складових їхнього прісного водного балансу

Table 1 – Morphometric characteristics of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast used to calculate the components of their fresh-water balance

№ п/п	Лиман	W – об’єм вод, млн. м ³	S – площа водного дзеркала, км ²	$H_{сер}$ – середня глибина, м	Відмітка рівня води у водоймі, м БС	Посилальне джерело
1	Тилігульський	693,0	128,85	5,4	-0,4	[5]
2	Дофінівський	4,5	6,1	0,74	-0,1	[2, 17]
3	Хаджибейський	729,0	114,0	6,4	1,5	[15]
4	Куяльницький	28,3	45,0	0,63	-6,2	Дослідження ОДЕКУ, 2016 р.
5	Будацький	31,5	30,0	1,05	-0,4	[2]
6	Тузлівська група	236,0	196,7	1,2	-0,3	[1, 20]
7	Сасик	414,3	197,3	2,1	0	Дослідження УкрНЦЕМ, 2008 р.

Чим вище значення вищевказаних показників-індексів, тим більша чутливість конкретного лиману до змін клімату.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У таблиці 2 наведені дані щодо річної норми атмосферних опадів у сучасний період 2000–2018 рр. та у найближчому майбутньому (2021–2050 рр., за сценарієм RCP4.5), порівняно з даними базового періоду (1961–1990 рр.). Відзначимо деяке збільшення річної кількості опадів у сучасний період, порівняно з базовим періодом, на станціях розташованих уздовж західного узбережжя північно-західної частини Чорного моря (Одеса, Білгород-Дністровський, Сарата), з наступним очікуваним їх зменшенням за сценарієм RCP4.5 в 2021–2050 рр. На станціях Сербка та порт-Південний північного узбережжя в 2021–2050 рр., навпаки, очікується незначне збільшення річної кількості опадів порівняно з сучасним періодом.

У табл. 3–4 наведені середні річні значення температури і відносної вологості повітря обчислені за багаторічними середньомісячними значеннями за ті ж періоди. З табл. 3 видно, що протягом ХХІ ст. відзначається поступове підвищення температури повітря проти базового періоду 1961–1990 рр. Середня річна температура повітря у період 2000–2018 рр. на 1,1–1,5 °С (10–14 %) вища, ніж у період 1961–1990 рр., а очікувана у період 2021–2050 рр. – вища на 2,5–3,6 °С (24–36 %).

Середні річні значення відносної вологості повітря у період 2000–2018 рр. майже не відрізняються від характерних для базового періоду 1961–1990 рр., на відміну від визначених як очікувані в період 2021–2050 рр. за сценарієм RCP4.5 згідно з симуляцією CLMcom4 (табл. 4). Останні зменшуються на 10–16 % порівняно з характерними для сучасного періоду значеннями.

Річні шари випаровування з водної поверхні в районах розташування обраних для аналізу метеорологічних станцій в північно-західному Причорномор'ї, обчислені із використанням формули (4) за різні досліджувані періоди, навед

дені в табл. 5. Видно, що з початку ХХІ ст. (2000–2018 рр.) випаровування з поверхні водойм збільшилось на 13–15 % уздовж північного узбережжя північно-західної частини Чорного моря і на 7–9 % – уздовж західного узбережжя, порівняно з базовим періодом 1961–1990 рр.

Як зазначалося вище, за обраною симуляцією CLMcom4 очікується зменшення в період 2021–2050 рр. річних значень відносної вологості повітря на 10–16 %, порівняно з характерними для сучасного періоду значеннями. Однак тенденція таких суттєвих змін не виявляється при порівнянні даних спостережень за вологістю повітря у періоди 2000–2018 та 1961–1990 рр. (табл. 4). Тому в табл. 5 для періоду 2021–2050 рр. визначались значення річного випаровування як з урахуванням очікуваних суттєвих змін вологості повітря згідно зі сценарієм RCP4.5, так і припускаючи, що суттєвих змін вологості повітря у порівнянні з періодом 2000–2018 рр. не відбудеться.

Оцінки наведені в табл. 5 свідчать, що тільки за рахунок підвищення температури повітря річний шар випаровування з водної поверхні лиманів у період 2021–2050 рр. збільшиться на 11–20 % порівняно з базовим періодом 1961–1990 рр. У разі врахування очікуваних змін не тільки температури повітря, але й його відносної вологості, шар випаровування збільшиться на 30–56 %.

Оцінки річних об'ємів припливу прісних вод зі стоком річок і малих водотоків до досліджуваних квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я з їхніх водозбірних басейнів у порушених водогосподарською діяльністю умовах, отримані із використанням моделі «клімат-стік», наведені в табл. 6. Встановлено, що, в середньому, об'єм припливу прісних вод до лиманів, за умов збереження сучасного рівня водогосподарської діяльності, в період 2021–2050 рр., порівняно з базовим періодом до 90-х років ХХ ст., зменшиться на 45% за кліматичних умов траєкторії сценарію RCP4.5.

Таблиця 2 – Річна кількість атмосферних опадів (мм) у періоди 1961-1990, 2000–2018 та 2021-2050 рр. (за сценарієм RCP4.5)

Table 2 – Annual precipitation (in mm) for 1961-1990, 2000-2018, and 2021-2050 (by RCP4.5 scenario)

№ п/п	Назва пункту спостережень	1961-1990 роки (дані Кадастру)	2000-2018 роки	2021-2050 роки
1	Очаків	417	425	-
2	Південний	-	441	466
3	Сербка	460	449	461
4	Одеса	464	485	450
5	Білгород-Дністровський	433	459	420
6	Сарата	482	488	428

Таблиця 3 – Середня річна температура повітря (°C) у періоди 1961-1990, 2000–2018 та 2021-2050 рр. (за сценарієм RCP4.5)

Table 3 – Annual temperature (in °C) for 1961-1990, 2000-2018, and 2021-2050 (by RCP4.5 scenario)

№ п/п	Назва пункту спостережень	1961-1990 роки (дані Кадастру)	2000-2018 роки	2021-2050 роки
1	Очаків	10,0	11,1	-
2	Південний	-	11,3	12,5
3	Сербка	9,4	10,7	12,0
4	Одеса	10,1	11,5	12,6
5	Білгород-Дністровський	10,6	12,1	13,6
6	Сарата	10,1	11,2	13,7

Таблиця 4 – Середнє річне значення відносної вологості повітря (%) у періоди 1961-1990, 2000–2018 та 2021-2050 рр. (за сценарієм RCP4.5)

Table 4 – Annual relative humidity (in %) for 1961-1990, 2000-2018, and 2021-2050 (by RCP4.5 scenario)

№ п/п	Назва пункту спостережень	1961-1990 роки (дані Кадастру)	2000-2018 роки	2021-2050 роки
1	Очаків	79	75	-
2	Південний	-	-	64
3	Сербка	73	72	65
4	Одеса	76	75	63
5	Білгород-Дністровський	77	-	66
6	Сарата	76	76	66

Таблиця 5 – Річна норма випаровування (мм), обчислена за періоди 1961-1990, 2000–2018 та 2021-2050 рр. (за сценарієм RCP4.5)

Table 5 – Annual evaporation (in mm) for 1961-1990, 2000-2018, and 2021-2050 (by RCP4.5 scenario)

№ п/п	Назва пункту спостережень	1961-1990 роки (дані Кадастру)	2000-2018 роки	2021-2050 роки *(**)
1	Очаків	761	856	-
2	Південний	-	857	1117 (894)
3	Сербка	855	968	1120 (1007)
4	Одеса	752	862	1175 (900)
5	Білгород-Дністровський	748	815	970 (832)
6	Сарата	768	824	1033 (890)

* – з урахуванням очікуваних суттєвих змін вологості повітря;

** – за припущення, що суттєвих змін вологості повітря у порівнянні з періодом 2000-2018 рр. не відбудеться.

Таблиця 6 – Результати оцінки змін припливу прісних вод від водотоків (млн.м³/рік) до досліджуваних лиманів північно-західного Причорномор'я за різних кліматичних умов, з урахуванням водогосподарської діяльності
Table 6 – Estimates of fresh-water inflow components (in million m³/year) into the quasi-closed lagoons by watercourses under different climatic conditions taking into account water management activity

Лиман	Назва річки	Базові (до 1990-х рр.)	Сучасний у XXI ст.	За сценарієм RCP4.5 (2021-2050 рр.)
Тилігульський	Тилігул (+інші)	33,1 (38,8)	22,5 (25,3)	19,5 (21,5)
Дофінівський	Великий Аджалик	3,03	1,8	1,88
Куяльницький	Великий Куяльник (+ інші)	12,8 (13,2)	6,78 (7,5)	6,8 (6,83)
Хаджибейський	Малий Куяльник (+Свинна)	12,6 (14,9)	6,29 (6,45)	5,78 (6,5)
Тузлівські лимани	Хаджидер (+Алкалія)	6,15 (9,65)	4,19 (7,02)	2,93 (4,9)
Сасик	Когильник (+Сарата)	44,2 (49,1)	32,7 (37,4)	30,3 (32,65)

Результати, наведені в табл. 7, свідчать, що до початку прояву кліматичних змін (тобто, до початку 90-х років XX ст.) дефіцит річного прісного водного балансу для більшості квазізакритих лиманів не перевищував декількох відсотків від об'єму води в них, окрім Тузлівської групи та Будацького лиманів (рис. 2). Але для останнього це не створювало значних проблем, оскільки не враховувалась можливість надходження до Будацького лиману розпріснених вод з Дністровського лиману, через штучно створені ерики в заплавах.

Однак оцінки складових річного водного балансу для перших десятирічь XXI ст., наведені в табл. 8, свідчать про виникнення або поглиблення дефіциту річного прісного водного балансу для всіх квазізакритих лиманів. Особливо відчутними ці зміни були для Куяльницького лиману, де сформувався річний дефіцит прісного балансу в 33 % від загального об'єму вод лиману, та До-

фінівського лиману – до 13 %. Для Тузлівської групи лиманів дефіцит збільшився з 20 % в базовий період до 25 % – в період 2000-2018 рр., для Тилігульського лиману – з 0,7 до 5,0 %, а для водосховища Сасик – з 1,2 до 6,3 % (рис. 2).

Очікувані у період 2021-2050 рр. за сценарієм RCP4.5 оцінки складових прісного водного балансу досліджуваних лиманів північно-західного Причорномор'я та величини їх нев'язки наведені у табл. 9. Видно, що врахування очікуваних змін відносної вологості повітря за результатами симуляції CLMcom4 призводить до значного збільшення нев'язки річного прісного водного балансу лиманів. Для Куяльницького лиману річний дефіцит балансу прісних вод досягає 91 % від загального об'єму його вод. У Дофінівському, Будацькому та Тузлівській групі лиманів нев'язка близька до 50 %, а у водосховищі Сасик – становить 20 % від об'ємів їхніх вод (рис. 2).

Таблиця 7 – Оцінки складових річного прісного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я у базовий період (1961-1990 рр.)

Table 7 – Estimates of annual fresh-water balance (in million m³/year) for the quasi-closed lagoons in reference period (1961-1990)

№ п/п	Лиман	W_P , млн. м ³ /рік	W_R , млн. м ³ /рік	W_E , млн. м ³ /рік	δW , млн. м ³ /рік
1	Тилігульський	60,29	38,8	-104,11	-5,02
2	Дофінівський	2,82	3,03	-4,68	1,17
3	Хаджибейський	52,90	14,9	-85,72	-17,92
4	Куяльницький	20,88	13,2	-33,84	0,24
5	Будацький	12,99	0,0	-22,44	-9,45
6	Тузлівська група	94,81	9,65	-151,06	-46,60
7	Сасик	91,03	49,1	-145,14	-5,01

Таблиця 8 – Оцінки складових річного прісного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я у сучасний період (2000-2018 рр.)**Table 8** – Estimates of annual fresh-water balance (in million m³/year) for the quasi-closed lagoons in the current period (2000-2018)

№ п/п	Лиман	W_P , млн. м ³ /рік	W_R , млн. м ³ /рік	W_E , млн. м ³ /рік	δW , млн. м ³ /рік
1	Тилігульський	57,33	25,3	-117,51	-34,88
2	Дофінівський	2,85	1,8	-5,24	-0,59
3	Хаджибейський	55,29	6,45	-98,27	-36,53
4	Куяльницький	21,83	7,50	-38,79	-9,46
5	Будацький	13,77	0,0	-24,45	-10,68
6	Тузлівська група	95,98	7,02	-162,08	-59,08
7	Сасик	92,22	37,4	-155,72	-26,1

Таблиця 9 – Оцінки складових річного прісного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я у період 2021-2050 рр. за сценарієм RCP4.5**Table 9** – Estimates of annual fresh-water balance (in million m³/year) for the quasi-closed lagoons in the near future (2021-2050) by RCP4.5 scenario

№ п/п	Лиман	W_P , млн. м ³ /рік	W_R , млн. м ³ /рік	W_E^* , млн. м ³ /рік	W_E^{**} , млн. м ³ /рік	δW^* , млн. м ³ /рік	δW^{**} , млн. м ³ /рік
1	Тилігульський	59,79	21,5	-144,05	-128,82	-62,76	-47,53
2	Дофінівський	2,78	1,88	-6,99	-5,48	-2,33	-0,82
3	Хаджибейський	51,30	6,5	-133,95	-102,60	-76,15	-44,80
4	Куяльницький	20,25	6,83	-52,88	-40,50	-25,80	-13,42
5	Будацький	12,6	0	-29,1	-24,96	-16,5	-12,36
6	Тузлівська група	84,18	4,9	-203,19	-175,06	-114,11	-85,98
7	Сасик	80,88	32,65	-195,22	-168,19	-81,69	-54,66

* – з урахуванням очікуваних суттєвих змін вологості повітря

** – за припущення, що суттєвих змін вологості повітря у порівнянні з періодом 2000-2018 рр. не відбудеться

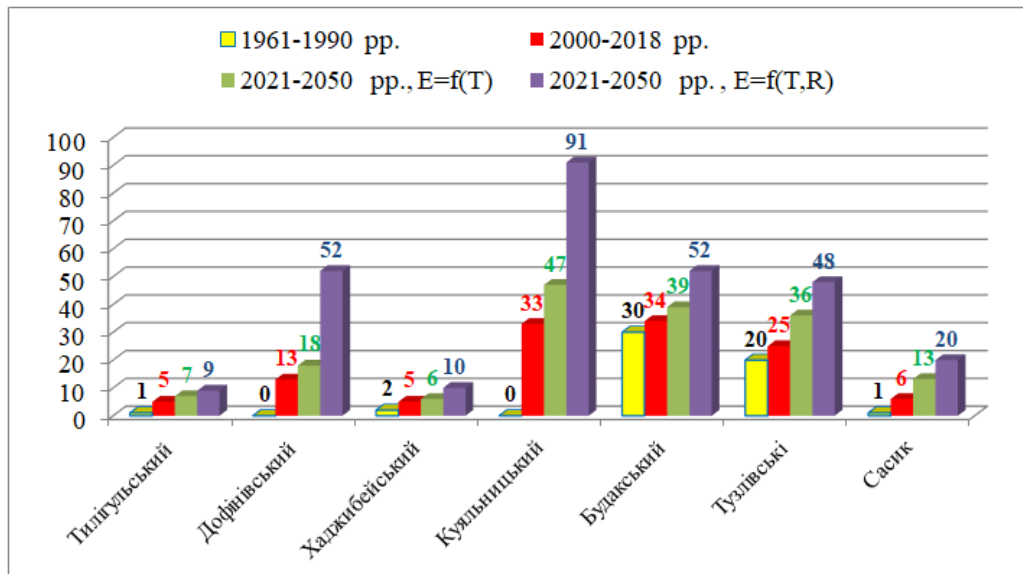
В той же час, збільшення нев'язок річного прісного балансу лиманів, розрахованих у припущенні, що суттєвих змін вологості повітря у період 2021-2050 рр. порівняно з 2000-2018 рр. не відбудеться, є меншим. Вони будуть становити близько 47 % від загального об'єму вод для Куяльницького лиману, 39 % – для Будацького лиману, 36 % – для лиманів Тузлівської групи, 18 % – для Дофінівського лиману і 13 % – для водойми Сасик (рис. 2).

На рис. 3 наведені значення показника I_{PE} , розраховані за формулою (5) для кожного з досліджуваних лиманів. Вони показують, який внесок у формування дефіциту прісного водного балансу лиманів вносить різниця річних об'ємів атмосферних опадів і випаровування з їх водної поверхні.

Отже отримані результати свідчать про те, що зміни кліматичних умов, які вже відбулись і очікуються у ХХІ ст., викликають суттєве збільшення дефіциту річного прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Для окремих лиманів зазначені зміни можуть створювати загрозу їхнього зник-

нення. З рис. 2-3 видно, що за вразливістю до змін клімату через виникнення значного річного дефіциту прісного водного балансу, у разі відсутності інших джерел надходження вод (наприклад, з моря), досліджувані лимани можуть бути ранжовані у такій послідовності: Куяльницький, Дофінівський, Будацький (за відсутності надходження вод з Дністровського лиману), Тузлівська група, Сасик, Тилігульський, Хаджибейський (за відсутності антропогенного стоку).

Слід зауважити, що оцінки інтенсивності випаровування, отримані із використанням залежності (3), не враховують вплив на неї поточної солоності вод в досліджуваних лиманах. Такий підхід продиктований тим, що солоність вод лиманів залежить не тільки від кліматичних умов, а, значною мірою, визначається антропогенним регулюванням водообміну лиманів з морем. Високі значення солоності вод знижують інтенсивність випаровування. Наприклад, для Куяльницького лиману, з урахуванням мінімальності солоності його вод 150-300 ‰, об'єм випаровування може бути на 25-50 % меншим.

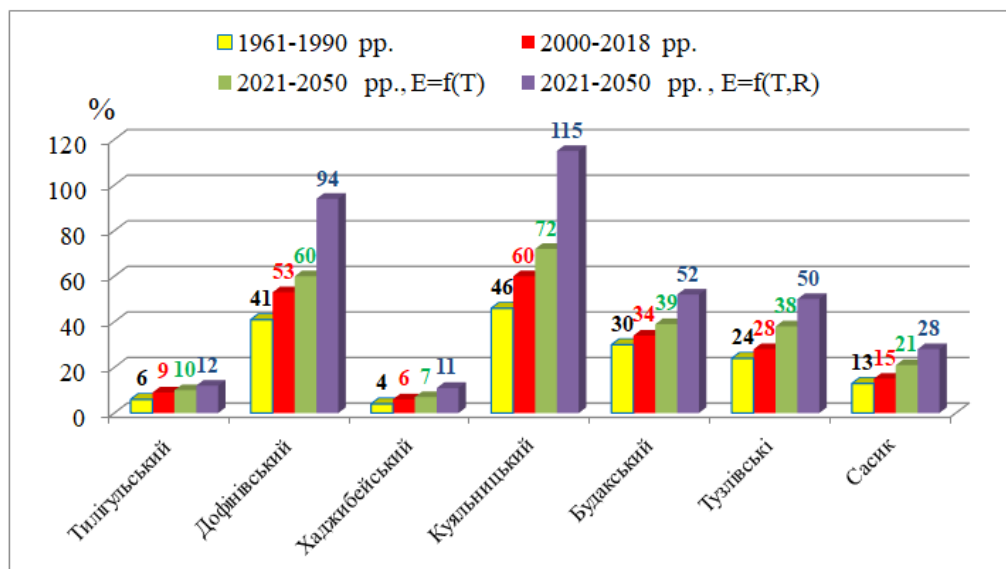


Позначення: $E = f(T)$ – випаровування розраховувалось у припущенні незмінності відносної вологості повітря порівняно з сучасним періодом; $E = f(T, R)$ – при розрахунках випаровування враховувались очікувані зміни не тільки температури повітря, а й його відносної вологості, за сценарієм RCP4.5

Note: $E = f(T)$ is the evaporation calculated under the assumption of constant air relative humidity as compared with the current period. $E = f(T, R)$ is the evaporation calculated with both temperature-induced and relative humidity-induced changes of evaporation are taken into account. The values are for the RCP4.5 climate change scenario

Рис. 2 – Відсоток річного дефіциту прісного водного балансу від середньорічного об'єму води (показник I_{PRE}) в квазізакритих лиманах північно-західного Причорномор'я

Fig. 2 – Percentage of annual deficit for fresh-water balance of the annual water volume (I_{PRE} index) for quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast



Позначення: $E = f(T)$ – випаровування розраховувалось у припущенні незмінності відносної вологості повітря порівняно з сучасним періодом; $E = f(T, R)$ – при розрахунках випаровування враховувались очікувані зміни не тільки температури повітря, а й його відносної вологості, за сценарієм RCP4.5

Note: $E = f(T)$ is the evaporation calculated under the assumption of constant air relative humidity as compared with the current period. $E = f(T, R)$ is the evaporation calculated with both temperature-induced and relative humidity-induced changes of evaporation are taken into account. The values are for the RCP4.5 climate change scenario

Рис. 3 – Відсоток річного дефіциту прісного водного балансу, який формується за рахунок різниці атмосферні опади-випаровування, від середньорічного об'єму води в лиманах (показник I_{PE})

Fig. 3 – Percentage of annual deficit for fresh-water balance (resulted from precipitation-evaporation difference) of the annual water volume in the quasi-closed lagoons (I_{PE} index)

5. ВИСНОВКИ

На підставі аналізу змін середньобаторічних значень метеорологічних характеристик, які визначають складові прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я, встановлено, що з початку ХХІ ст. відбувається:

- поступове підвищення температури повітря – середня річна температура повітря у період 2000-2018 рр. на 11-14 % вища, ніж у період 1961-1990 рр., а очікувана у період 2021-2050 рр. – вища на 24-36 %;
- зменшення відносної вологості повітря у період 2021-2050 рр. на 10-16 %;
- збільшення річного шару випаровування з водної поверхні водойм на 13-15 % у період 2000-2018 рр. уздовж північного узбережжя північно-західної частини Чорного моря і на 7-9 % – уздовж західного узбережжя;
- у період 2021-2050 рр. збільшення річного шару випаровування з водної поверхні лиманів тільки за рахунок підвищення температури повітря – на 11-20 %, а у разі врахування очікуваного зменшення відносної вологості – на 30-56 %;
- збільшення на 2-6 % річної кількості атмосферних опадів у період 2000-2018 рр. та наступне зменшення їх на 3-11 % в 2021-2050 рр. за сценарієм RCP4.5 уздовж західного узбережжя північно-західної частини Чорного моря, порівняно з періодом 1961-1990 рр.

Оцінки очікуваного припливу прісних вод від річок і малих водотоків до квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я, отримані із використанням моделі «клімат–стік» за умови збереження сучасного рівня водогосподарської діяльності, свідчать, що у період 2021-2050 рр. об'єми припливу зменшаться порівняно з базовим періодом (до 90-х років ХХ ст.) на 45% у кліматичних умовах траєкторії сценарію RCP4.5.

Встановлено, що зміни кліматичних умов, які вже відбулись і очікуються в ХХІ ст. спричиняють збільшення дефіциту річного прісного водного балансу квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я, які для окремих лиманів, як, наприклад, Куяльницького, Дофінівського, Будацького (за відсутності антропогенного регулювання зовнішнього водообміну), Тузлівської групи лиманів, можуть створювати загрозу їх зникнення. За вразливістю до змін клімату через виникнення значного річного дефіциту прісного водного балансу, у разі відсутності інших джерел надходження вод (наприклад, з

моря), лимани ранжовані у такій послідовності: Куяльницький, Дофінівський, Будацький (за відсутності надходження вод з Дністровського лиману), Тузлівська група, Сасик, Тилігульський, Хаджибейський (за відсутності надходження стоку з антропогенних джерел).

Для найбільш вразливих до змін клімату лиманів в першу чергу повинні розроблятися науково-обґрунтовані плани управління річковими басейнами, інтегрованого управління прибережними територіями, до складу яких входять лимани, плани дій для досягнення «доброго» екологічного стану їх акваторій, що передбачено Морською природоохоронною стратегією України. Для більшості квазізакритих лиманів ефективно вирішення проблеми стабілізації їх гідроекологічного режиму в умовах збільшення дефіциту прісного водного балансу, зумовленого зміною клімату, полягає в забезпеченні постійного протягом року різноспрямованого водообміну з морем через штучні з'єднувальні канали з морфометричними характеристиками, за яких не буде відбуватись засолення лиманів у багаторічній перспективі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розенгарт М. Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов одесских лиманов: монография. Киев: Наукова думка, 1974. 217 с.
2. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология: монография / под ред. Ю. П. Зайцева, Б. Г. Александрова, Г. Г. Миничевой. Киев: Наукова думка, 2006. С. 351-355.
3. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья: монография / Одесский государственный экологический университет; под ред. Ю.С. Тучковенко, Е.Д. Гопченко. Одесса: ТЕС, 2012. 224 с.
4. Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) : монографія. Київ : Ніка-центр, 2010. 316 с.
5. Водні ресурси та гідроекологічний стан Тилігульського лиману: монографія / за ред. Ю. С. Тучковенко, Н. С. Лободи. Одеса: ТЕС, 2014. 276 с.
6. Водний режим та гідроекологічні характеристики Куяльницького лиману / за ред. Н.С. Лободи, Є.Д. Гопченка. Одеса: ТЕС, 2016. 332 с.
7. Тучковенко Ю. С., Тучковенко О. А. Модель евтрофикации морских и лиманных экосистем северо-западного Причерноморья. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. 21. С. 75-89. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.08>
8. Lloret J., Marín A., Marín-Guirao L. Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change? *Estuar Coast Shelf Sci*. 2008. 78(2). Pp. 403–412.
9. Anthony A., Atwood J., August P. et al. Coastal lagoons and climate change: ecological and social ramifications in U.S. Atlantic and Gulf coast ecosystems. *Ecology and Society*. 2009. 14(1). Pp.8.

10. Sustainable management in Mediterranean coastal lagoons: interactions among capture fisheries, aquaculture and the environment / Cataudella S., Crosetti D., Ciccotti E., Massa F. *Studies and reviews No. 95, General Fisheries Commission for the Mediterranean*. Rome. 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Pp. 29-35.
11. Is the governance of the Thau coastal lagoon ready to face climate change impacts? / La Jeunesse, C. Cirelli, H. Sellami et al. *Ocean & Coastal Management*. 2015. Vol.118, Part B. Pp. 234–246.
12. Coastal lagoons: ecosystem processes and modeling for sustainable use and development / Edited by Gönenç I. E., Wolflin J. P. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2005.
13. Renй Friedland Climate change in the definition of water management objectives. *Coastal&Marine*. 2014. 23(1). Pp. 8-9.
14. Мінічева Г. Г., Соколов Є. В. Оцінка природної стійкості лиманів північно-західного Причорномор'я відповідно до принципів Водної Директиви ЄС. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2014. 5 (47).
15. Тучковенко Ю. С., Козлов М. О. Водний баланс Хаджибейського лиману у сучасний період. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2017. № 21. С. 66-77.
16. Тучковенко Ю. С., Гопченко Е. Д., Адобовський В. В., Большаков В. Н. Регулирование гидроэкологического режима Дофинского лимана. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2008. № 3. С. 124 - 147.
17. Соколов Е. В. Интегрально-диагностическая оценка экосистемы Дофинского лимана. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2012. № 14. С. 36-47
18. Шуйский Ю. Д., Выхованец Г. В. Природа Причерноморских лиманов: монография. Одесса: Астропринт, 2011. 276 с.
19. Бургаз М. І. Особливості формування іхтіоценозу Шаболатського лиману в умовах антропогенної трансформації водойми: дис... к-та біол. наук / ІМБ НАН України. Одеса, 2018. 189 с.
20. Попова О. М. Морфометрія та топонімія гідрологічних об'єктів Національного природного парку «Тузловські лимани». *Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки*. 2016. Т. 21, вип. 2. С.64-84.
21. Іванова Н. О. Динаміка рівня водної поверхні Сасика на різних етапах існування водойми. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2018. №4 (51). С. 63-75.
22. Assessment of River Water Inflow into the Sasyk Estuary-Reservoir According to RCP4.5 and RCP8.5 Climate Change Scenarios for 2021-2050 / Loboda N. S., Tuchkovenko Y. S., Kozlov M. O., Katynska I. V. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*. 2021. 30(2). Pp. 315–325.
23. Тимченко В.М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья: монография / Институт гидробиологии АН Украины. Киев: Наукова думка, 1990. 240 с.
24. Кліматичний Кадастр України (електронна версія) / Державна гідрометеорологічна служба УкрНДГМІ. Центральна Геофізична Обсерваторія. Київ, 2006.
25. Loboda N., Bozhok Y. Impact of climate change on water resources of North-Western Black Sea region. *Int. J. Res. Earth. Environ. Sci*. 2015. 2(9). Pp. 1–6.
26. The next generation of scenarios for climate change research and assessment / Moss R. H. et al. *Nature*. 2010. Vol. 463. Pp. 747-756.
27. Хохлов В. М., Серга Е. М., Недострелова Л. В. Об'єктивний вибір симуляції з ансамблю регіональних кліматичних моделей. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2021. № 28. С. 29-36. <https://doi.org/10.31481/uhmj.28.2021.03>
28. Иванов Н. Н. Об определении величин испаряемости. Москва: Изв. ГГО, 1954. С. 189–196.
29. Модель “климат-сток” в расчетах и прогнозах водных ресурсов Украины / Гопченко Є. Д., Лобода Н. С., Божок Ю. В., Козлов М. А. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. №3(54). С. 53-54.
30. Лобода Н. С., Козлов М. О., Куза А. М. Прогностичні оцінки водних ресурсів Північно-Західного Причорномор'я у XXI сторіччі за набором кліматичних сценаріїв на базі моделі «клімат-стік». *Річки та лимани Причорномор'я на початку XXI сторіччя: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., 17-18 жовтня. Одеса. 2019. С. 100-102.*

REFERENCES

1. Rozengurt, M.Sh. (1974). *Gidrologiya i perspektivy rekonstruktsii prirodnikh resursov Odesskikh limanov* [Hydrology and prospects for the reconstruction of natural resources of the Odessa lagoons]. Kiev: Naukova dumka. (in Russ.)
2. Zaitsev, Y.P., Aleksandrov, B.G. & Minicheva, G.G. (Eds.), (2006) *Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya: biologiya i ekologiya* [The North-Western Part of the Black Sea: Biology and Ecology]. Kiev : Naukova dumka, pp. 351-255. (in Russ.)
3. Tuchkovenko, Yu.S. & Gopchenko, E.D. (eds). (2011). *Aktual'nye problemy limanov severo- zapadnogo Prichernomor'ya* [Topical problems of lagoons of the North-Western Black Sea Region]. OSENU. Odessa : TES Publ. (in Russ.)
4. Grebin, V.V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrainy (landshafno-hidrolohichni analiz)* [The modern water conditions of Ukrainian rivers (landscape-hydrological analysis)]. Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
5. Tuchkovenko, Yu.S., Loboda, N.S. (eds). (2014). *Vodni resursy ta hidroekologichni stan Tylihul'skoho lymanu* [Water resources and hydroecological conditions of the Tylihul'skiy Liman Lagoon]. OSENU. Odesa : TES Publ. (in Ukr.)
6. Loboda N.S. & Gopchenko E.D. (eds). (2016). *Vodnyy rezhym ta hidroekologichni kharakterystyky Kuyal'nyts'koho lymanu* [Water regime and hydroecological characteristics of Kuyal'nitskiy Liman]. OSENU. Odesa: TES Publ. (in Ukr.)
7. Tuchkovenko, Y.S., & Tuchkovenko, O.A. (2018). The model of eutrophication of marine and estuarine ecosystems in the northwest Black Sea Region. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (21), pp. 75-89. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.08>
8. Lloret J., Marín A. & Marín-Guirao, L. (2008). Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change? *Estuar Coast Shelf Sci*, 78(2), pp. 403–412
9. Anthony, A., Atwood J., August P. et al. (2009). Coastal lagoons and climate change: ecological and social ramifications in U.S. Atlantic and Gulf coast ecosystems. *Ecology and Society*, 14(1), p.8.
10. Cataudella, S. et al. (2015). Sustainable management in Mediterranean coastal lagoons: interactions among capture fisheries, aquaculture and the environment. *Studies and reviews, No. 95, General Fisheries Commission for the Mediterranean*. Rome. Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 29-35.
11. La Jeunesse, C. Cirelli, H. Sellami et al. (2015). Is the governance of the Thau coastal lagoon ready to face cli-

- mate change impacts. *Ocean & Coastal Management*, 118, part B, pp. 234–246
12. Gönenc, I.E. & Wolflin, J.P. (eds). (2005). *Coastal lagoons: ecosystem processes and modeling for sustainable use and development*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
13. Renñ Friedland (2014). Climate change in the definition of water management objectives. *Coastal&Marine*, 23(1), pp. 8–9.
14. Minicheva, G.G. & Sokolov, E.V. (2014). *Estimation of the Natural Resistance of Northwestern Prichernomorie Region's Estuaries in Accordance with a Principles of EU WFD. Scientific reports of NULES of Ukraine*, 5 (47). (in Ukr.)
15. Tuchkovenko, Yu.S. & Kozlov, M.O. (2017). Current water balance of Khadzhibeyskyi liman. *Bulletin of Odessa State Environmental University*, 21, pp. 66–77. (in Russ.)
16. Tuchkovenko, Y.S. et al. (2008). Management of hydroecological regimen of Dofinovka estuary. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 3, pp. 124–147. (in Russ.)
17. Sokolov, E.V. (2012). Integrally-diagnostic estimation of the Dofinovskiy Lyman (estuary) ecosystem. *Bulletin of Odessa State Environmental University*, 14, pp.36–41. (in Russ.)
18. Shuisky, Yu.D. & Vykhovanetz, G.V. (2011). *Priroda Prichernomorskih limanov* [Nature of limanic coast of the Black Sea]. Odesa : Astroprint. (in Russ.)
19. Burhaz, M.I. (2018). *Osoblyvosti formuvannia ikhtiotsenozu Shabolatskoho lymanu v umovakh antropohennoi transformatsii vodoimy* [Peculiarities of the formation of the ichthyocenosis of the Shabolat estuary in the conditions of anthropogenic transformation of the reservoir]. Abstract of Ph.D. Thesis in Hydrobiology. Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine. Odesa. (in Ukr.)
20. Popova, E.N. (2016). Morphometry and toponymy of the hydrological objects in the National Nature Park “Tuzlovskie Limany”. *Odesa National University Herald*, 21(2), pp. 64–84. (in Ukr.)
21. Ivanova, N.O. (2018). The dynamics of the level of the water surface of Sasyk at different stages of the existence of the reservoir. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia. [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 4(51), pp. 63–75. (in Ukr.)
22. Loboda, N. S. et al. (2021). Assessment of River Water Inflow into the Sasyk Estuary-Reservoir According to RCP4.5 and RCP8.5 Climate Change Scenarios for 2021–2050. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 30(2), pp. 315–325.
23. Timchenko, V.M. (1990). *Ekologo-gidrologicheskie issledovaniya vodoemov Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya* [Environmental and Hydrological Researches into the Water Bodies in the North-Western Black Sea Region]. Institute of Hydrobiology of NASU. Kiev: Naukova Dumka. (in Russ.)
24. State Hydrometeorological Service of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute. Central Geophysical Observatory. (2006). *Klimatychnyi Kadastr Ukrainy (elektronna versiiia)* [Climate Cadastre of Ukraine (electronic version)]. Kyiv. (in Ukr.)
25. Loboda, N. & Bozhok, Y. (2015) Impact of climate change on water resources of North-Western Black Sea region. *Int. J. Res. Earth. Environ. Sci*, 2(9), pp. 1–6.
26. Moss R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 2010, vol. 463, pp. 747–756.
27. Khokhlov, V., Serga, E., & Neodstrelova, L. (2021). Objective selection of model run from regional climate models ensemble. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (28), pp. 29–36. <https://doi.org/10.31481/uhmj.28.2021.03> (in Ukr.)
28. Ivanov, N.N. (1954). *Ob opredelenii velichin isparjaemosti* [On determining the values of evaporation], *Izvestiya Glavnoy geofizicheskoy observatorii* [News of the Main Geophysical Observatory], pp. 189–196. (in Russ.)
29. Gopchenko, E.D, et al. (2019). Model “klimat-stok” v raschetah i prognozakh vodnyh resursov Ukrainy [Climate-runoff model in calculations and forecasts of water resources of Ukraine]. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia* [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology], 3 (54), pp. 53–54. (in Russ.)
30. Loboda, N.S., Kozlov, M.O. & Kuza, A.M. (2019). [Forecast estimates of water resources of the North-Western Black Sea coast in the XXI century based on a set of climate scenarios based on the “climate-runoff” model]. *Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktaktychnoi konferentsii “Richky ta lymany Prychornomoria na pochatku XXI storichchia”* [Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Rivers and estuaries of the Black Sea at the beginning of the XXI century”], 17–18 October. Odesa, pp. 100–102. (in Ukr.)

CLIMATE CHANGE IMPACT ON WATER BALANCE OF QUASI-CLOSED LAGOONS IN THE NORTH-WESTERN BLACK SEA COAST

Yu. Tuchkovenko, V. Khokhlov, N. Loboda

*Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, tuch2001@ukr.net*

The paper studies the impact of regional climate changes that occurred in the past and are expected to occur in the near future on the components of the annual fresh water balance of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast. Currently these lagoons have no permanent connection with the sea. However, there are some episodic connections via artificially created channels, ducts and other waterworks. The value of insufficiency of the studied lagoons' annual fresh water balance is used as an indicator of their ecosystems' sensitivity to climate change. Action plans must be created and implemented for the lagoons that are the most sensitive to changes in regional climatic conditions in order to achieve and maintain their "good"

environmental quality status.

The climate-induced changes of meteorological parameters in the North-Western Black Sea coast that determine the components of the lagoons' water balance are estimated for two periods: the current one from 2000 to 2018 (based on the observations made at coastal meteorological stations) and the near-future one of 2021-2050 which is compared to the 1961-1990 period (based on the data of the Climate Cadastre of Ukraine). The expected climatic conditions in the near future (2021-2050) were determined by the RCM simulations of the Euro-CORDEX project for the RCP4.5 climate change scenario.

The research evaluates the components of the lagoons' fresh water balance (precipitation reaching the lagoons' water surface, fresh water inflow from the catchments, evaporation from the lagoons' water surface) and identifies the residuals (shortages) of annual balance. It uses the "climate-runoff" hydrological model for the above climatic periods to determine the fresh water inflow into the lagoons through the watercourses of their catchment areas. The annual evaporation layer from the lagoons' water surface was evaluated using the long-term average monthly values of temperature and relative humidity for each of the periods.

It was established that the climatic changes that occurred earlier and those expected in the current century caused and will cause the increasing insufficiency of the annual fresh water balance of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast. This can threaten salinization, shallowing or even disappearance of some lagoons. Thus new strategies for water and environmental management of such lagoons must be developed. In terms of vulnerability to climate changes leading to significant annual insufficiency of fresh water balance (if there are no other water sources, e.g. water from the sea), lagoons are ranked in the following order: Kuialnytskyi Lagoon, Dofinivskyi Lagoon, Budatskyi Lagoon (if there is no water inflow from the Dniistrovskyi Lagoon), the Tuzla group of lagoons, Sasyk Lagoon, Tyligulskyi Lagoon, Hadzhybeisky Lagoon (if there is no anthropogenic runoff).

Keywords: the North-Western Black Sea coast; quasi-closed lagoons; climate change; fresh water balance; insufficiency

Подання до редакції : 23. 05. 2022

Надходження остаточної версії : 05. 06. 2022

Публікація статті : 07. 07. 2022

УДК 574.5(262.5.05)

АБІОТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕКОСИСТЕМ СУХОГО І ГРИГОРІВСЬКОГО ЛИМАНІВ ЯК АКВАТОРІЙ МОРСЬКИХ ПОРТІВ (ПІВНІЧНО-ЗАХІДНА ЧАСТИНА ЧОРНОГО МОРЯ)

О. К. Виноградов, Ю. І. Богатова, І. О. Синьогуб

ДУ «Інститут морської біології Національної академії наук України»
бул. Пушкінська, 37, 65048, Одеса, Україна, bogatovayu@gmail.com

Розглядаються розташування, походження, абіотичні особливості екосистем Сухого та Григорівського лиманів, перетворених у другій половині ХХ ст. в акваторії великих морських портів України – Чорноморськ та Південний відповідно. На підставі аналізу літературних даних і архівних матеріалів Інституту морської біології НАНУ надається порівняльна характеристика абіотичних умов цих екосистем. Показано, що спорудження постійних і глибоких проходів на акваторії лиманів, проведення великомасштабних днопоглиблювальних робіт призвело до їх перетворення у вузькі морські затоки з глибинами, що значно перевищують такі на прилеглих ділянках моря. Будівництво причалів супроводжувалося вирівнюванням берегової лінії, зміною профілю дна, збільшенням об'ємів води в лиманах більше, ніж в три рази. Тепер вони дорівнюють 45–55 млн м³ в Сухому і 60–70 млн м³ в Григорівському лимані. Сучасні абіотичні особливості екосистем обох лиманів визначаються процесами, які відбуваються в Одеському морському регіоні північно-західної частини Чорного моря, в межах якого вони розташовані. Гідрохімічний режим в лиманах залежить від метеорологічних особливостей року, інтенсивності водообміну з морем, кількості біогенних речовин, що мають як природне (поверхневий стік, опади), так і антропогенне походження, внутрішньо-водоємних процесів продукування і деструкції органічної речовини. Після поглиблення в лиманах з'явилися умови для формування гало- і термоклин, що утруднюють вертикальний водообмін. Відзначено формування зон з екстремальними значеннями розчиненого кисню – максимальні значення в поверхневому шарі обумовлені розвитком фотосинтезу, мінімальні в придонному – накопиченням і деструкцією мертвої органічної речовини. Отримана інформація може бути використана для передбачення наслідків, що виникають при аналогічних антропогенних утручаннях у функціонування прибережних морських екосистем.

Ключові слова: Сухий і Григорівський лимани; морські порти; екосистеми; абіотичні особливості; антропогенні впливи; північно-західна частина Чорного моря

1. ВСТУП

Під лиманами (від грецького «limen» – гавань, бухта) маються на увазі напівзамкнені прибережні водойми зазвичай витягнутої форми, які, як правило, утворюються в розширених гирлах річок, затоплених морем. Розрізняють відкриті лимани, що мають постійний зв'язок з морем, і закриті – постійно або більшу частину року відокремлені від моря піщаною косою (пересипом). Екосистеми лиманів належать до високопродуктивних, але дуже чутливих до швидких змін абіотичних умов як через природні причини, так і в результаті антропогенної діяльності [1, 2].

Сухий та Григорівський (Малий Аджалицький) лимани, які поряд із Хаджибейським, Куяльницьким та Дофінівським (Великим Аджалицьким) лиманами нерідко відносять до групи

Одеських лиманів, одночасно являються і компонентами Одеського морського регіону (ОМР). Північною межею ОМР прийнято вважати гирло Григорівського лиману, південною – гирло Сухого лиману. Морською межею ОМР є ізобата 20 м. Центральне положення на узбережжі регіону займає Одеська затока. Сухий лиман знаходиться за 20 км на південний захід від Одеської затоки, Григорівський – за 30 км на північний схід від нього.

Метою даної роботи було показати сучасні абіотичні умови (морфометричні характеристики, гідрологічні і гідрохімічні показники) існування гідробіонтів в екосистемах Сухого і Григорівського лиманів після перетворення їх в акваторії морських портів Чорноморськ і Південний відповідно.

Актуальність роботи визначається тим, що під впливом антропогенних і природних чинників в лиманах-портах постійно відбуваються зміни абіотичних умов, і, як наслідок, їх біот, що потребує перманентних досліджень і узагальнень. Дане узагальнення мінливості абіотичних умов для обох лиманів наведене вперше. Як матеріали для дослідження використувались опубліковані і архівні дані Інституту морської біології (ІМБ) НАНУ щодо походження, морфометричних характеристик, гідродинаміки, температури, солоності, кисневого режиму вод лиманів, вмісту у воді біогенних сполук, а також дані щодо гідробіологічних і екологічних особливостей лиманів, наслідків антропогенних утручань. Регулярні спостереження за екосистемами обох лиманів співробітниками ІМБ НАНУ виконуються з кінця 1990-х років.

У науковій літературі перші відомості про екосистеми Сухого і Григорівського лиманів та використання їх ресурсів з'явилися у другій половині XIX ст. Публікації про абіотичні особливості і біотичні компоненти екосистем цих вододій вельми численні [3-16].

Багаторічні спостереження за змінами в біотичних складових екосистем Сухого і Григорівського лиманів під впливом різних антропогенних чинників сприяють розумінню процесів, що відбуваються при аналогічних утручаннях у функціонування прибережних морських екосистем.

2. РОЗТАШУВАННЯ ТА ПОХОДЖЕННЯ ЛИМАНІВ

Сухий і Григорівський лимани розташовані у прибережній смузі Причорноморської низовини на ділянці берега Дніпровсько-Дністровського міждріччя поблизу м. Одеси. Вони належать до групи малих морських полігалінних лиманів з площею водного дзеркала до 6 км² і являють собою затоплені морем гирлові ділянки невеликих маловодних рівнинних річок. Сухий лиман утворився у долині річки Великий Дальник, а Григорівський – у долині річки Малий Аджалик. Лимани сформувалися близько 10–11 тис. років тому після останнього льодовикового періоду, коли в результаті танення льоду рівень Чорного моря значно піднявся і гирла та низовини річок опинилися під водою. Близькі до сучасного вигляду риси обидва лимани набули за останні 5,0–5,5 тис. років, коли рівень Чорного моря досяг позначок, близьких до теперішніх. У періоди трансгресій і регресій моря площа лиманів і глибини в них істотно змінювалися. Солоність води, характер донних відкладів та їх розподіл у лиманах

були пов'язані з водністю впадаючих до них річок, кількістю місцевих атмосферних опадів та наявністю або відсутністю зв'язку з морем. До початку антропогенних перетворень у другій половині XX ст. обидва лимани були відокремлені від моря піщаними косами, в яких внаслідок штормів чи в результаті антропогенної діяльності періодично з'являлися невеликі промоїни і канали, тобто лимани мали періодичний зв'язок з морем, який іноді переривався на роки.

Близько 100 років тому Н.А. Загоровський [3] надав докладний опис фізико-географічних особливостей лиманів північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ) та запропонував схему їхньої еволюції. По Н.А. Загоровському лимани проходять три етапи або стадії еволюції. На першому – річковому етапі – водно-сольовий режим визначається, передусім, річковим стоком. Цей етап має назву «потамолімен». У складі біоти важливу роль відіграють прісноводні гідробіоти. На другому етапі – морському – русло річки заповнюється наносами, її вплив слабшає і головним фактором стає зв'язок з морем. Лиман перетворюється на морську затоку, в якій провідну роль відіграють морські організми. Цей етап зветься «таласолімен». На третьому – власне лиманному етапі – зв'язок із морем, внаслідок утворення піщаної коси, послаблюється або повністю переривається. Сольовий склад води під впливом різних факторів (атмосферні опади, випаровування тощо) змінюється, біота набуває специфічних рис. Поступово ложа лиманів заповнюються наносами, водойми висихають і лише зрідка можуть заповнитися водою, перетворюючись з часом на солончаки. Це стадія «еулімена». До другої половини XX ст. екосистеми Сухого та Григорівського лиманів опинилися на етапі «еулімена».

В кожному з лиманів з початком етапу «еулімена» формувалися три основні зони: у вершинній (кутовій) частині – зона з переважним впливом прісноводного стоку; в нижній – зона, яка перебуває під впливом моря; між ними – проміжна зона. При природному або штучному припиненні надходження прісної води таке зонування відсутнє.

Сучасні абіотичні особливості екосистем Сухого та Григорівського лиманів визначаються процесами, що відбуваються в ОМР, в межах якого вони розташовані (рис. 1).

ОМР знаходиться під впливом трансформованих, опріснених водних мас з Дніпровсько-Бузького лиману і урбанізованого теригенного стоку. Цей вплив посилюється в піки повеней багатоводних років. У максимальні за водністю

роки поверхневий шар моря (0–5 м) аж до Одеської затоки та мису Великий Фонтан може опріснюватися до 5 ‰. До морського гирла Сухого лиману ці води, зазвичай, не поширюються. Стік Дністра, через свою порівняльну маловодність і спрямованість переважно на південь, помітного впливу на регіон не надає.

Належить відзначити, що на узбережжі ОМР в містах Одеса, Чорноморськ і Південний постійно мешкають близько 1,3 млн осіб і чисельність населення у літній період зростає більш ніж удвічі. Така концентрація населення надає як прямий, так і опосередкований вплив на абіотичні та біотичні особливості екосистеми регіону.

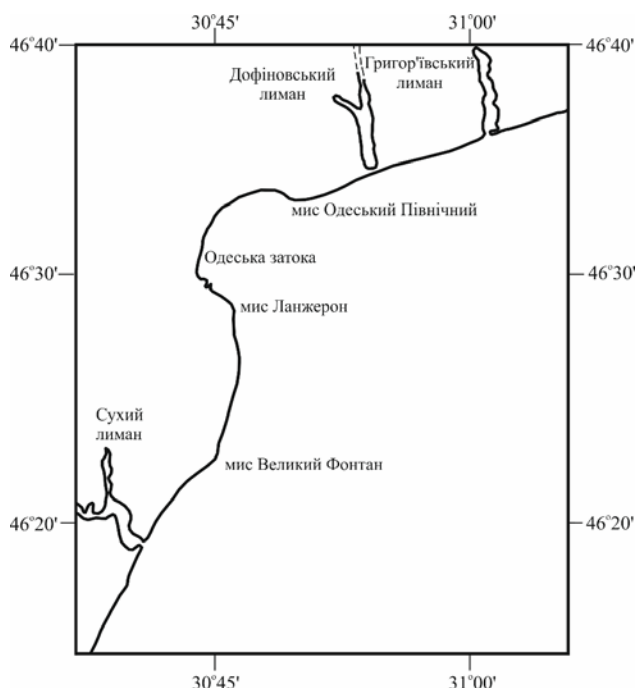


Рис. 1 – Карта-схема Одеського морського регіону
Fig. 1 – Scheme map of the Odesa maritime region

Температурний режим ОМР багато в чому визначається циркуляційними умовами у приземному шарі атмосфери. Через Одеський регіон пролягає межа двох типів клімату – помірно-континентального та континентального, що сприяє нестійкості гідрометеорологічного режиму [10]. У регіоні за швидкостями та напрямками переважають північні, північно-східні та східні вітри. Для вод регіону характерні відгінно-нагінні процеси, а також формування двошарової структури вод зі значними вертикальними градієнтами температури і солоності. Протягом більшої частини року на глибинах 5–7 м і більше формується стійкий пікноклін – стрибок щільності, що ускладнює вертикальний водообмін.

3. МОРФОМЕТРИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА АНТРОПОГЕННІ ВТРУЧАННЯ

Сухий лиман. До початку будівництва морського порту (МП) в Сухому лимані і м. Чорноморськ (колишній Іллічівськ) слабкий вплив на його екосистему надавали населені пункти, розташовані на берегах лиману. В окремі роки водойма майже повністю пересихала, площа її водного дзеркала скорочувалася до 1 км², тобто до 15–20 % від первісної; максимальна глибина лиману була 4–5 м, середня – близько 1,5 м. Солоність води внаслідок випаровування періодично зростала до 45–50 ‰, при цьому зі складу біоти лиману випадало багато видів гідробіонтів, тобто біорізноманіття зменшувалось.

Наприкінці 1957 р. у пересипу Сухого лиману був прорізаний судноплавний канал, розпочаті днопоглиблювальні роботи на акваторії, спорудження причалів МП, залізничних під'їзних колій та інших об'єктів інфраструктури, будівництво м. Чорноморськ. Спорудження дамби у вершині лиману, по якій було прокладено залізничне полотно, зменшило його довжину з 10 км до 7,2 км. У відокремленому верхів'ї в вершині річки Великий Дальник з'явилися невеликі рибоводні ставки [13]. Після перетворень в акваторії лиману природно виділяються три басейни розділені штучним островом Дамбовим – Південний, Центральний і Північний. Водообмін між Центральним і Північним басейнами послаблений за рахунок висунутих з обох берегів дамб, між якими тривалий час функціонувала понтонна автомобільна переправа. В теперішній час тут будується стаціонарний залізобетонний міст.

З морем Сухий лиман та МП Чорноморськ з'єднані підхідним каналом довжиною понад 1,5 км, шириною по дну 170 м та глибиною до 14,5–15,0 м. До МП веде штучний канал шириною 150 м та глибиною до 15 м. Вхід в канал захищений двома паралельними молами (шпорами), висунутими у море до глибини 5,2 м. З їх зовнішнього боку утворилися обширні піщані мілководдя, більш виражені уздовж лівої шпори. Будівництво молів та глибокого підхідного каналу послабило уздовжбереговий потік наносів, спрямований на південний захід, що спричинило розмивання берега в районі м. Чорноморськ. Площа поперечного перерізу проходу в Сухий лиман близько 2,5 тис. м².

В теперішній час довжина Сухого лиману 7,2 км, середня ширина близько 1,5 км, площа водного дзеркала 5,7 км². Середня глибина в

Південному та Центральному басейнах – 8,5 м, максимальна – 15 м. У Північному басейні днопоглиблення здійснювалося тільки у вузькому каналі, який веде до заводу залізобетонних виробів (функціонував до 1990-х років) і в теперішній час глибини у ньому зменшились з 4,0–4,5 м до 2,5–3,0 м. Об'єм води в лимані був поступово збільшений з 12–15 млн м³ до 45–55 млн м³ [12, 14, 15]. Причали МП Чорноморськ розміщені переважно у Південному басейні, сумарна протяжність причалів та інших гідротехнічних споруд у лимані становить близько 8 км, площа їх підводних поверхонь – близько 80 тис. м².

Південний та Центральний басейни лиману в теперішній час зазнають сильного антропогенного впливу внаслідок функціонування Чорноморського та Рибного портів, поромної залізничної переправи, поверхневого стоку з території м. Чорноморськ та інших населених пунктів. На східному березі Північного басейну з 2010-х років функціонує колектор стічних вод, опріснюючий і евтрофуючий вплив якого поширюється також на Центральний басейн. На більшій частині Північного басейну глибини не перевищують 1 м, дно вкрите товстим шаром напіврідкого осаду, який легко збаламучується. За останні роки характер берегів басейну суттєво змінився – майже на всій їх протяжності сформувалася широка смуга поселень очерету.

Таким чином, під впливом антропогенної діяльності в Сухому лимані зник пересип, змінилися рельєф ложа та берегів, динамічні, фізичні, гідрохімічні та гідробіологічні властивості лиманної води. Деякі зміни призвели до помітного покращання екологічної ситуації в Південному басейні [6, 9, 12] і в меншій мірі – в Центральному, а про Північний басейн цього сказати не можна.

Григорівський лиман. Першим масштабним втручанням людей в екосистему Григорівського лиману стало будівництво в його північній частині наприкінці 1960-х років дамби з мостом і вузьким каналом під ним і автомобільної дороги. Як наслідок, довжина водойми зменшилася з 11 км до 7,2 км. Довжина східного берега, переважно більш низького і пологого, – близько 7 км; західного, більш високого і крутого, – близько 5 км. Найбільша ширина лиману близька до 1,2 км, середня – 0,8 км, площа водяного дзеркала становить 5,8 км².

До будівництва Одеського припортового заводу (ОПЗ) та МП Південний прямий або опосередкований антропогенний вплив на екосистему лиману чинили населені пункти, птахофабрика

та тваринницькі ферми, розташовані на його берегах.

Найбільші зміни в екосистемі Григорівського лиману пов'язані з будівництвом у середній частині західного берега ОПЗ причалів для суден, що транспортують його продукцію, а також зі спорудженням глибоководних причалів та інфраструктури порту Південний на протилежному березі у найширшій частині водойми. Попередні роботи з будівництва підхідного каналу, проходу в лиман і днопоглиблення в його пригирловій частині були розпочаті у 1971 р., а масштабні днопоглиблювальні роботи і будівництво на узбережжі водойми причалів та інших споруд порту – в серпні 1973 р.

ОПЗ призначався головним чином для виробництва, акумулювання і великотоннажного зберігання карбаміду, аміаку, метанолу та ряду інших речовин, токсичних для гідробіонтів. В експлуатацію ОПЗ був введений в 1978 р. Окрім причалів ОПЗ, на західному березі лиману поблизу проходу знаходиться причал для перевантаження піску, у верхній частині – термінал з обробки рідких олій та зерновий термінал. На східному березі в нижній частині лиману розташований нафтоермінал, у середній – термінали МП Південний, що здійснюють перевалку генеральних та навалочних вантажів, у верхній частині – причали компанії «Трансінвестсервіс». В 2019–2020 роках у вершинній частині лиману вздовж дамби, якою проходить автомобільна дорога, побудований глибоководний причал довжиною близько 400 м.

До початку будівництва МП Південний глибини на більшій частині Григорівського лиману не перевищували 2,0–2,5 м, у центральній частині водойми вони сягали 5–6 м, а в найглибшому місці – 8 м. Днопоглиблювальні роботи в лимані від проходу до вершини проводили у кілька етапів. У 2019–2020 роках глибини на фарватері та біля ряду причалів були доведені до 21–22 м. МП Південний став найбільш глибоководним портом України та одним із найбільш глибоководних портів на Чорному морі.

На відміну від Сухого лиману, у Григорівському немає поділу на басейни – він є єдиною акваторією від проходу до вершинної частини.

До МП Південний у морі прокладено підхідний канал довжиною близько 4 км, шириною по дну 170 м і глибиною 21–22 м. Вхід до лиману захищений двома висунутими у море молами (шпорами) – Східним та Західним. Як і у випадку з Сухим лиманом, навколо молів сформувалися піщані мілководдя. Площа поперечного перерізу проходу в Григорівський лиман стано-

вить понад 3,5 тис. м². Загальна довжина гідротехнічних споруд у лимані близька до 8 км, площа їх підводних поверхонь – 110 тис. м². На відміну від Сухого лиману, в якому глибоководні причали тісно розташовані вже безпосередньо поблизу від проходу, в Південному та Центральному басейнах, у Григорівському лимані причали розташовані на окремих, віддалених одна від одної ділянках берега переважно в середній і верхній частинах водойми.

Таким чином, після спорудження постійних і глибоких проходів на акваторії обох лиманів та проведення в них великомасштабного днопоглиблення, вони перетворилися у вузькі морські затоки з глибинами, що значно перевищують такі в прилеглих ділянках моря. Днопоглиблення та будівництво причалів призвели до вирівнювання та спрощення берегової лінії, зміни профілю дна в обох лиманах. У пригирловій частині Григорівського лиману, на відміну від Сухого, є піщані і мулистопіщані мілководдя, які добре промиваються, а вище як біля західного, так і східного берегів на ділянках, не порушених гідробудівництвом, зберігаються черепашковопіщані коси довжиною до 10–30 м, а також окремі кам'яністі ділянки, які відсутні в Сухому лимані. Топічне розмаїття умов у Григорівському лимані значно більше, ніж у Сухому.

4. ГІДРОЛОГО-ГІДРОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ

Гідрологічні і гідрохімічні особливості екосистем Сухого та Григорівського лиманів тісно пов'язані і синхронізовані зі змінами водних мас безпосередньо на прилеглих до них ділянках моря. Вони зазвичай визначаються процесами, що відбуваються в ОМР і у всій ПЗЧМ, а також внутрішньо водомийними процесами, властивими кожному з них. Завдяки широким і глибоким проходом на акваторії, обидва лимани набули спроможність інтенсивно обмінюватися водними масами із сусідніми ділянками моря. Водобмін відбувається, насамперед, завдяки дрейфовим та компенсаційним течіям. Основною причиною їх виникнення є вітер. За вітрів різних напрямків та сили об'єм води в обох лиманах змінюється. Після антропогенних втручань об'єм води в них збільшився більш ніж утричі і становить близько 45–55 млн м³ у Сухому лимані та 60–70 млн м³ – у Григорівському. Хоча наявність штучних проходів у лимані і сприяє водобміну з морем, він, однак, має пульсуючий характер і значно поступається вільному водобміну в прибережних екосистемах моря.

У лиманах, як і на прилеглий акваторії ОМР, розвиваються вітрові хвилі. Однак, завдяки оголоженості акваторій високими берегами та гідротехнічними спорудам, хвилі в лиманах не досягають таких же розмірів як безпосередньо в морі. При дії сильних осінніх та зимових штормових вітрів рідкісної повторюваності висота хвиль може досягати 0,7–1,1 м, а довжина – до 20–25 м. Сейшові коливання рівня не перевищують 0,3–0,4 м. Відгінно-нагінні вітри дають імпульс для зміни води в лиманах. Навіть при порівняно слабких вітрах 4–7 м·с⁻¹ зміна води через глибоководні проходи може відбуватися за десятки годин [11, 12, 14, 15]. Повторюваність значних відгінно-нагінних явищ з року в рік змінюється і становить в середньому п'ять разів [10]. У водобміні беруть участь, насамперед, поверхневі водні маси (3–5 м) акваторій лиманів. Морфометричні особливості обох водойм – відносно невеликі розміри, орієнтація з півночі на південь Григорівського лиману і з заходу на схід Сухого, призводять до виникнення сильних дрейфових та компенсаційних течій за штормових вітрів відповідних напрямків. При цьому гідрологічні умови швидко змінюються. У проході з моря до Сухого лиману під дією відгінних та нагінних вітрів швидкості течій досягають $\geq 0,4\text{--}0,8\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Швидкості компенсаційних течій після нагону в лимані на 15–20 % більші за швидкості з моря в лиман. Через прохід до лиману може втікати і витікати від 680 м³·с⁻¹ до 1360 м³·с⁻¹ води. Теоретично вода в Сухому лимані може повністю змінюватися кілька разів на рік [12].

В Григорівському лимані максимальні швидкості течій на поверхні зазвичай не перевищують 0,3 м·с⁻¹, а біля дна – 0,15 м·с⁻¹. У проході на акваторію лиману періодично спостерігається потужна течія, спрямована з моря. Фіто- та зоопланктонні організми, ікра, личинки та ранні мальки риб не здатні протистояти таким течіям і разом з водними масами заносяться до лиману [11].

Вітри північних напрямків – для Григорівського лиману і західних – для Сухого викликають відгін, за якого відбувається винос поверхневої водної маси з лиманів у море та виникають компенсаційні течії у придонному шарі, спрямовані з моря у водойми. Більшу частину року це сприяє оновленню вод придонного шару лиманів відносно чистими морськими, але влітку, коли на прилеглих до них ділянках моря може розвиватися гіпоксія, це призводить до погіршення кисневого режиму вод в лиманах. Окрім того у навітряних берегів у верхів'ях лиманів через апвелінг можуть формуватися зони інтенсивного

продукування органічної речовини водоростями. Під час нагонів придонна водна маса, багата біогенними речовинами і мертвою органічною речовиною, але бідна на кисень, витікає з лиманів по судноплавним каналам, а до лиманів втікає морська вода.

Більшу частину року в глибоководних ділянках акваторій Сухого та Григорівського лиманів спостерігається двошарова структура водних мас, розділена сезонним пікнокліном (стрибком щільності), що виникає при великій відмінності температури та солоності поверхневих та придонних вод, і утруднює вертикальний водообмін від поверхні до дна. Провідну роль у формуванні сезонного пікнокліну відіграє весняно-літній прогрів поверхневих вод, а навесні свій внесок надає їх додаткове розпріснення. Зазвичай поверхневий шар утворює тепліша і легша вода, що містить високу концентрацію кисню, а придонний – холодніша, більш солоніша і щільна вода з низьким вмістом кисню [11, 14, 15]. Формування сезонного пікнокліну у весняно-літній період року в глибоких лиманах створює передумови для розвитку гіпоксії та аноксії у придонному шарі вод внаслідок слабкої їх вентиляції.

Вертикальна однорідність води відзначається зазвичай в осінньо-зимовий період року внаслідок охолодження поверхневих вод та сильного вітрово-хвильового перемішування від поверхні води до глибин 15–20 м під час штормів. Потужні осінньо-зимові шторми та перемішування води до великих глибин сприяють виведенню мертвої органічної речовини, що накопичується в теплий період року, змучуючи і приводячи в рух донні відклади.

Температура води в лиманах, мінливість якої носить сезонний характер, є одним з найважливіших чинників, що регулюють біологічні та екологічні процеси у водоймах. У поверхневому шарі вод Сухого і Григорівського лиманів температура влітку може підвищуватися до 28–30 °C, а на мілководдях біля берега навіть більше. Однак вже на глибині 2 м температура зазвичай не перевищує 24 °C. В глибоких частинах лиманів відмінність у температурі між поверхневим та придонними шарами води влітку може сягати 20 °C. В окремі холодні зими температура поверхневого шару води може падати до 0 °C і на мілководдях, в особливо холодні роки, може утворюватися крига. При сильних відгінно-нагінних явищах в ОМР і лиманах перепади температури протягом доби можуть становити 10–12 °C. Внутрішньорічний перебіг температури поверхневого горизонту води в обох лиманах вказує, що максимум припадає на серпень і пер-

шу половину вересня (пік літнього гідрологічного сезону), а мінімум – на лютий (пік зимового) та збігається із середньобаторічним внутрішньорічним перебігом температури в ОМР [11, 14, 15].

Солоність води для гідробіонтів є не менш важливим екологічним чинником, ніж температура. Для Сухого лиману звичайною є солоність 14–16 ‰. У поверхневому шарі Центрального басейну діапазон коливань солоності становить 5,3–18,0 ‰. Відмінності у значеннях солоності в поверхневому та придонному шарах води можуть складати 10–12 ‰ і зберігатися протягом всього року. Це свідчить, що навіть у зимовий період у лимані не відбувається повне перемішування води, утруднене формуванням галокліну.

У 1950-х–1970-х роках, до розкриття пересипу, солоність води у північній частині Григорівського лиману коливалася від 11 ‰ до 13 ‰, в середній та південній частинах – від 15 ‰ до 18 ‰. За наявності прорви в пересипу, під час весняної повені на Дніпрі та Південному Бузі водні маси, що проникали з прилеглого узмор'я, сприяли повному водооновненню лиману і солоність іноді знижувалася до 3–4 ‰, а влітку, в результаті випаровування, зростала до 30 ‰ і вище. Найбільша солоність води (33,4 ‰) у водоймі була відзначена у 1926 р. Нині, за наявності каналу, мінімальні значення солоності 3,5–5,0 ‰ у поверхневому шарі лиману спостерігаються навесні багатководних років, у період повені на Дніпрі при східному чи південно-східному вітрах. Навесні в лимані формується пікноклін і встановлюється двошарова галинна структура: у верхньому шарі, товщиною 3–5 м, солоність становить 7–8 ‰, а в придонному – 15–17 ‰. В літній період значення солоності зближуються [11, 14, 15]. Внутрішньорічний перебіг солоності води поверхневого шару в обох лиманах більшу частину року відповідає перебігу солоності в ОМР та визначається адвекцією вод відповідно до їх загальної циркуляції уздовж північного берега ПЗЧМ. Розподіл солоності в придонному шарі води обох лиманів і, перш за все, в судноплавних каналах і біля причалів, характеризується слабкою сезонною мінливістю і високими показниками солоності – 16–18 ‰.

Кисневий режим води у лиманах визначає життєдіяльність всіх груп багатоклітинних та багатьох груп одноклітинних гідробіонтів та бактерій, а також мінливість гідрохімічних параметрів їх екосистем, що, так чи інакше, впливає на всі водні організми. У воду кисень надходить як з атмосфери внаслідок газообміну через

водну поверхню, так і внаслідок фотосинтетичної діяльності фітопланктону та макрофітів. Газообмін з атмосферою (інвазія або евазія) регулює вміст кисню у воді близько до значення, яке відповідає 100 % насиченню. Збільшення вмісту кисню понад 100 % насичення забезпечується за рахунок фотосинтезу та може сягати 150–200 % і більше. Насиченість води киснем менше 100 % свідчить про значне витрачання його на біохімічне окиснення та біологічне розкладання (деструкцію) мертвої органічної речовини, яке переважає утворення кисню за рахунок фотосинтезу. Всі ці прояви мають місце в екосистемах Сухого та Григорівського лиманів, особливо у придонному горизонті води глибоководних ділянок [5, 9, 11, 12, 14, 15].

У літній період у поверхневому шарі води Сухого лиману зафіксовано максимальний вміст кисню – $15,7 \text{ мгО}_2 \cdot \text{дм}^{-3}$ (189 % насичення). У деякі сезони року вміст кисню в придонному шарі знижується до $0,8\text{--}1,1 \text{ мгО}_2 \cdot \text{дм}^{-3}$ при насиченні всього 10–15 %. Неприятливі кисневі умови, як правило, виникають в мілководному Північному басейні вже в травні, а з подальшим прогрівом водних мас на окремих ділянках лиману відзначають і нульовий вміст кисню.

У багаторічній мінливості вмісту розчиненого кисню у воді Григорівського лиману відзначені добре виражені коливання з літніми максимумами в поверхневому горизонті (до $15\text{--}16 \text{ мгО}_2 \cdot \text{дм}^{-3}$, більше 190 % насичення) та мінімумами (гіпоксія, аноксія) на придонному горизонті (менше 30 % насичення). Формування зон з екстремальними значеннями розчиненого кисню у теплий період року обумовлено розвитком фотосинтезу у поверхневому шарі та накопиченням і деструкцією мертвої органічної речовини на дні. Гіпоксію у придонному шарі в теплий період року відзначали як у південній глибоководній частині лиману, так і в його північній мілководній частині. У глибоководній зоні придонна гіпоксія може бути викликана підходом холодних соляних вод з низьким вмістом кисню і слідами сірководню з прилеглої ділянки відкритого моря після тривалих вітрів північних румбів, які обумовлюють відгін поверхневих вод з лиману. При цьому створюється компенсаційна течія у придонному шарі із моря в лиман. Для холодної пори року, коли відбувається згасання продукційних процесів, характерний рівномірний розподіл розчиненого у воді кисню від поверхні до дна. В окремі роки, наприклад в серпні 1995 р., на початку жовтня 2007 р., після серії відгінних вітрів у придонному горизонті практично по всій акваторії лиману насичення води киснем не пе-

ревищувало 30 %. Такі показники кисню є критичними для організмів бентосу.

Важливим для гідробіонтів чинником є величина рН. Морська вода в нормі має рН 8,1–8,3. З цієї причини вуглекислий газ, необхідний автотрофам, добре в ній розчиняється і його дефіцит не спостерігається. У Південному та Центральному басейнах Сухого лиману у поверхневому шарі води відзначені коливання величини рН від 8,2 до 9,2. У Північному басейні рН інколи знижується до 7,2–7,5 і в придонному шарі ці показники відзначаються протягом більшої частини року. У воді Григорівського лиману величина рН коливається від 7,5 біля дна до 9,2 в поверхневому шарі. В теплий період року при масовому розвитку фітопланктону і «цвітінні» води величина рН досягає максимальних значень 8,8–9,2, а в придонному шарі при деструкції органічної речовини (ОР) та гіпоксії величина рН знижується до 7,2–7,8. У холодну пору року значення рН від поверхні до дна досить близькі – 8,3–8,4 [10, 11].

Біогенні речовини – сполуки біогенних елементів, які беруть участь у життєдіяльності водних організмів при створенні первинної продукції органічної речовини (ОР) в процесі фотосинтезу. У воді Сухого лиману відзначається висока концентрація біогенних речовин, які забезпечують продукування ОР (табл. 1).

Діапазон мінливості вмісту біогенних речовин у воді Сухого лиману значно вищий, ніж в прилеглій акваторії моря. Виняток – вміст мінеральних сполук азоту, який в лимані нижчий. Це пов'язано з високою швидкістю споживання в лимані мінеральних сполук азоту для створення нової ОР. Відзначено, що домінування окисненої форми азоту – нітратів (NO_3^-) над відновленою – амонійною (NH_4^+) спостерігається лише ранньою весною у Південному та Центральному басейнах лиману. Влітку, у зв'язку з підвищенням інтенсивності процесів деструкції, вміст ОР знижується і різко підвищується вміст відновленої форми азоту – NH_4^+ [9, 10, 14, 15].

Необхідно відзначити важливу роль донних відкладів Григорівського лиману в евтрофуванні його вод. Відомо, що надходження біогенних речовин з донних відкладів у водних екосистемах за рахунок іонного обміну на геохімічний межі «вода-дно» є істотним резервом для біологічної продуктивності і одним з важливих компонентів біогеохімічного балансу. Концентрації біогенних речовин в порових розчинах донних відкладів (вода в інтерстіціальних просторах мулу), які щорічно поповнюються відмерлою ОР фітопланктону, на порядок і більше перевищу-

ють їх концентрації у водній товщі лиману (табл. 2). Дифузія мінеральних і ОР з порових розчинів в придонний шар лиману, яка посилюється під час розвитку гіпоксії і при проведенні днопоглиблювання, сприяє збагаченню водної товщі цими сполуками та викликає її евтрофування.

Для води Григорівського лиману, як і Сухого, характерний високий рівень розчиненої ОР, що свідчить про високий вміст в ній легкоокислюваної ОР (продукти метаболізму гідробіонтів, відмерлий бактеріо-, фіто- та зоопланктон, ОР антропогенного походження). Сезонна мінливість розчиненої ОР (за даними БСК₅) дуже значна – від менше 1 мгО₂·дм⁻³ до 6–7 мгО₂·дм⁻³ [5, 11, 15].

В екосистемах лиманів продукція первинної, а зазвичай і вторинної ОР вища, ніж в прилеглих ділянках моря, і в них утруднено виведення надлишків ОР. Таке поєднання умов гальмує бактеріальну деструкцію ОР в кисневих умовах і супроводжується її накопиченням. Це сприяє формуванню стійких зон гіпоксії та аноксії, появи сірководню в донних відкладах і в придонному горизонті. Найбільш інтенсивно процес утворення сірководню йде у верхньому шарі відкладів (мулів) товщиною 1-2 см і рідко проникає глибше 10 см.

Мертва ОР у зваженому та розчиненому стані є потенційним джерелом розчинених мінераль-

них сполук азоту та фосфору, що використовуються водними автотрофами. Анаеробна мінералізація мертвої ОР відбувається при концентрації кисню не менше 3 мгО₂·дм⁻³ і закінчується утворенням нітратів і ортофосфатів, які легко засвоюються автотрофами. Особливо активно мінералізація ОР відбувається на мілководдях лиманів в теплий період року. В анаеробних умовах, що складаються на дні лиманів, деструкція завершується утворенням амонійного азоту та більш токсичних нітритів.

Гідрохімічний режим в лиманах – акваторіях морських портів, залежить від метеорологічних особливостей року, інтенсивності водообміну з морем внаслідок вітрової дії, кількості біогенних речовин, що мають як природне (поверхневий стік, атмосферні опади), так і антропогенне походження, внутрішньо-водоємних процесів продукування і деструкції ОР. В цих екосистемах рівень мінеральних і органічних сполук азоту і фосфору стабільно високий і не лімітує розвиток продукційних процесів.

Зведені відомості про деякі абіотичні характеристики Сухого та Григорівського лиманів, які можуть впливати на особливості розвитку біотичних компонент водної екосистеми, наведені у табл. 3.

Таблиця 1 – Середні значення деяких гідрохімічних показників в Сухому лимані і прилеглий частині моря (за даними моніторингу 2014–2015 рр.)

Table 1 – Average values of some hydrochemical indicators in the Sukhyi Estuary and the adjacent part of the sea (according to monitoring data of 2014–2015)

Місце	N _{мін}	N _{орг}	P _{мін}	P _{орг}	Si, мг·дм ⁻³	POP*, мгО ₂ ·дм ⁻³	S, %	O ₂ , % нас.
	мгN·дм ⁻³		мгP·дм ⁻³					
Лиман	0,050	1,77	0,105	0,143	2,24	4,97	15,57	100,7
Море	0,092	0,92	0,025	0,012	0,91	2,91	16,00	104,0

*POP – розчинену органічну речовину визначали за БСК₅

Таблиця 2 – Середні значення деяких гідрохімічних показників в Григорівському лимані і прилеглий частині моря (за даними моніторингу 2014–2016 рр.)

Table 2 – Average values of some hydrochemical indicators in the Grygorivskyi Estuary and the adjacent part of the sea (according to the monitoring data of 2014–2016)

Місце	N _{мін}	N _{орг}	P _{мін}	P _{орг}	Si, мг·дм ⁻³	POP*, мгО ₂ ·дм ⁻³	S, %	O ₂ , % нас.
	мгN·дм ⁻³		мгP·дм ⁻³					
Лиман	0,034	0,61	0,033	0,034	2,31	3,70	15,8	130,6
Море	0,030	0,47	0,020	0,029	1,54	2,72	14,2	119,9
Порові розчини**	0,380	5,90	0,875	0,611	9,25	26,64	–	–

*POP – розчинену органічну речовину визначали за БСК₅;

** – порові розчини донних відкладів лиману

Таблиця 3 – Порівняльна характеристика абіотичних показників акваторій та водних мас Сухого та Григорівського лиманів
Table 3 – Comparative characteristics of abiotic indicators of water areas and water masses of the Sukhyi and Grygorivskiy Estuaries

Показник	Лиман	
	Сухий	Григорівський
Площа водозбору, км ²	347	343
Прісноводний стік	зарегульований	зарегульований
Зв'язок з морем	постійний	постійний
Особливості акваторії	розділена на три басейни	єдина
Довжина акваторії, км	7,2	7,2
Середня ширина акваторії, км	1,5	0,8
Максимальна ширина акваторії, км	3,0	1,2
Площа акваторії, км ²	5,7	5,8
Середня глибина, м	8,5	13,0
Максимальна глибина, м	15	22
Об'єм води, млн м ³	45–55	60–70
Ширина проходу на акваторію по дну, м	150	170
Глибина проходу, м	15	22
Площа поперечного перерізу проходу на акваторію, м ²	≈ 2500	≈ 3500
Довжина причалів, м	≈ 8000	≈ 8000
Підводна площа гідротехнічних споруд, м ²	≈ 80000	≈ 110000
Висота хвиль, м	0,4–1,0	0,5–1,1
Довжина хвиль, м	20–25	20–25
Прозорість води, м	0,2–1,0	0,5–2,5
Температура води, °C	до 28–30	до 28–30
Солоність води, ‰	7,0–17,5	3,5–17,5
Лужність, рН одиниць	7,2–9,2	7,5–9,2
Вміст кисню в товщі води, мг·дм ⁻³	5,0–15,0	5,0–15,0
БСК ₅ , мгО ₂ ·дм ⁻³	1,5–7,0	0,8–7,0

Як свідчать данні наведені у таблиці, в результаті антропогенної перебудови абіотичні умови в обох лиманах стали багато в чому подібними. Розвиток продукційних процесів в лиманах не лімітований рівнем біогенних речовин. Однак в Сухому лимані екологічні умови існування гідробіонтів істотно погіршуються від Південного басейну до Північного, тобто по мірі зменшення водооношення морськими водами, тоді як в Григорівському лимані сприятливі умови зберігаються аж до самої вершини.

Внаслідок змін, умови існування гідробіонтів у лиманах наблизились до умов у прилеглих районах моря. Склад біот в обох лиманах збільшився у порівнянні з станом до початку будівництва портів і схожий [10, 11, 13].

5. ВИСНОВКИ

В роботі відзначено, що Сухий і Григорівський лимани до середини ХХ ст. знаходилися на третьому, завершальному етапі своєї еволюції – «еулімена» (за класифікацією Н.А. Загоровського, 1927): водойми були ізольовані від моря при значній варіабельності абіотичних умов, завдяки чому склад біотичного компонента їхніх екосистем був збідненим. Внаслідок будівництва в акваторії лиманів морських портів Чорноморськ і Південний, постійних широких і глибо-

ких підхідних каналів, днопоглиблення в акваторії лиманів, відбулося перетворення їх в морські затоки, абіотичні умови в яких стабілізувалися і наблизилися до таких, як у прилеглих районах моря. Відбулося омолодження екосистем і повернення їх на попередній етап еволюції – «тала-солімена», завдяки чому біологічне різноманіття зросло.

У теперішній час особливості абіотичних умов них визначаються: (1) умовами водообміну з відкритим морем через судноплавні канали, насамперед, внаслідок ініційованих вітром відгінно-нагінних коливань рівня моря; (2) утворенням різко вираженого пікноклину у вертикальному розподілі щільності води, який значно зменшує інтенсивність вертикального масо і газообміну між поверхневим і придонним шарами води, внаслідок як прогріву, так і розпріснення поверхневого шару вод..

Незважаючи на постійний зв'язок лиманів-портів з морем, водообмін з ним утруднений, а наявність вертикальної стратифікації водних мас веде до накопичення мертвої органічної речовини в придонному шарі, гіпоксії, аноксії, утворення сірководню.

Донні відклади лиманів-портів щорічно поповнюються відмерлою органічною речовиною фітопланктону, містять значну кількість мінеральних і органічних сполук. Завдяки обміну на

геохімічній межі «вода-дно», якій посилюється під час розвитку гіпоксії і при проведенні днопоглиблювання, вони є істотним резервом для біологічної продуктивності водойм та сприяють розвитку евтрофування.

Перспектива подальших досліджень полягає в детальному аналізі того, як описані абіотичні особливості екосистем Сухого і Григорівського лиманів впливають на їх біотичні компоненти.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Дедю И. И. Экологический энциклопедический словарь. Кишинев : Гл. ред. МСЭ, 1990. 408 с.
- Реймерс И. Ф. Природопользование: словарь-справочник. Москва : Мысль, 1990. 637 с.
- Загоровский Н. А. Материалы к физико-географическому описанию лиманов Северного Причерноморья. *Украинский бальнеологический сборник*. 1927. Вып. 2–3. С. 89–142.
- Розенгарт М. Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов Одесских лиманов. Киев : Наукова думка, 1974. 224 с.
- Современное состояние экосистемы Аджалыкского лимана / Рясинцева Н. И. и др. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2000. С. 114–126.
- Старушенко Л. И., Бушуев С. Г. Причерноморские лиманы Одесщины и их рыбохозяйственное использование. Одесса : Астропринт, 2001. 151 с.
- Нестерова Д. А. Фитопланктон Григорьевского лимана и сопредельной части Черного моря в современных условиях. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія. Спеціальний випуск: Гідроекологія*. 2001. № 3 (14). С. 77–78.
- Нестерова Д. А. Фитопланктон Сухого лимана и сопредельной части Черного моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2002. Вып. 1 (6). С. 328–337.
- Характеристика экологического состояния Сухого лимана / Павлютина Л. П. и др. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2005. Вып. 12. С. 120–128.
- Северо-западная часть Черного моря: биология и экология / отв. ред. Ю. П. Зайцев, Б. Г. Александров, Г. Г. Миничева. Киев : Наукова думка, 2006. 701 с.
- Экосистема Григорьевского (Малого Аджалыкского) лимана / под ред. А. К. Виноградов. Одесса : Астропринт, 2008. 263 с.
- Шуйский Ю. Д., Выхованец Г. В. Природа Причерноморских лиманов. Одесса : Астропринт, 2011. 276 с.
- Виноградов А. К., Хуторной С. А. Ихтиофауна Одесского региона северо-западной части Черного моря (биологические, экологические, эколого-морфологические особенности). Одесса : Астропринт, 2013. 224 с.
- Виноградов А. К., Богатова Ю. И., Синегуб И. А. Экосистемы акваторий морских портов Черноморско-Азовского бассейна (Введение в экологию морских портов). Одесса : Астропринт, 2012. 528 с.
- Виноградов А. К., Богатова Ю. И., Синегуб И. А. Экология морских портов Черноморско-Азовский бассейн. Одесса : Астропринт, 2014. 568 с.
- Виноградов А. К., Богатова Ю. И., Синегуб И. А. Роль портов и судоходства в формировании морских биот (неполносолёные моря Европы). Одесса : Астропринт, 2018. 500 с.

REFERENCES

- Dediu, I.I. (1990). *Ekologicheskiiy entsiklopedicheskiy slovar'* [Ecological Encyclopedic Dictionary]. Kishinev: Gl. red. MSE (in Russ.).
- Reymers, I.F. (1990). *Prirodopol'zovaniye: slovar'-spravochnik* [Nature management: a dictionary-reference book]. Moscow: Mysl' (in Russ.).
- Zagorovskiy, N.A. (1927). Materialy k fiziko-geograficheskomu opisaniyu limanov Severnogo Prichernomor'ya [Materials for the physical and geographical description of the estuaries of the Northern Black Sea region]. *Ukrainskiy bal'neologicheskiiy sbornik – Ukrainian balneological collection*, 2-3, pp. 89-142 (in Russ.).
- 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 estuaries]. Kyiv: Naukova dumka (in Russ.).
- Ryasintseva, N.I. et al. (2000). Sovremennoye sostoyaniye ekosistemy Adzhalyk'skogo limana [Current state of the ecosystem of the Adzhalyk estuary]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoye ispol'zovaniye resursov shel'fa – Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, pp. 114-126 (in Russ.).
- Starushenko, L.I., & Bushuyev, S.G. (2001). *Prichernomorskiye limany Odessskikh i ikh rybokhozaystvennoye ispol'zovaniye* [Black Sea estuaries of the Odessa region and their fishery use]. Odessa: Astroprint (in Russ.).
- Nesterova, D.A. (2001). Fitoplankton Grigor'yevskogo limana i sopredel'noy chasti Chernogo morya v sovremennykh usloviyakh [Phytoplankton of the Grigorievsky estuary and the adjacent part of the Black Sea in modern conditions]. *Naukovi zapysky Ternopil's'koho natsional'noho pedahohichnoho. universytetu imeni Volodymyra Hnatyuka – Scientific Notes of the Ternopil National Pedagogical Institute. University named after Volodymyr Gnatyuk*, 3 (14), pp. 77-78 (in Russ.).
- Nesterova, D.A. (2002). Fitoplankton Sukhogo limana i sopredel'noy chasti Chernogo morya [Phytoplankton of the Sukhoy estuary and the adjacent part of the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoye ispol'zovaniye resursov shel'fa – Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, 1 (6), pp. 328-337 (in Russ.).
- Pavlyutina, L.P. et al. (2005). Kharakteristika ekologicheskogo sostoyaniya Sukhogo limana [Characteristics of the ecological state of the Sukhoy estuary]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoye ispol'zovaniye resursov shel'fa – Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, 12, pp. 120-128 (in Russ.).
- Zaytsev, Yu.P., Aleksandrov, B.G. & Minicheva, G.G. (Ed.). (2006). *Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya: biologiya i ekologiya* [North-western part of the Black Sea: biology and ecology].

- biology and ecology]. Kyiv: Naukova dumka (in Russ.).
11. Vinogradov, A.K. (Ed). (2008). *Ekosistema Grigor'evskogo (Malogo Adzhalykskogo) limana [Ecosystem of the Grigorievsky (Small Adzhalyk) estuary]*. Odessa: Astroprint (in Russ.).
12. Shuyskiy, Yu.D., & Vykhovalyts, G.V. (2011). *Priroda Prichernomorskikh limanov [The nature of the Black Sea estuaries]*. Odessa: Astroprint (in Russ.).
13. Vinogradov, A.K., & Khutornoy, S.A. (2013). *Ikhtiofauna Odesskogo regiona severo-zapadnoi chasti Chernogo morya (biologicheskoye, ekologicheskoye, ekologo-morfologicheskoye osobennosti) [Ichthyofauna of the Odessa region of the northwestern part of the Black Sea (biological, ecological, ecological and morphological features)]*. Odessa: Astroprint (in Russ.).
14. Vinogradov, A.K., Bogatova, Yu.I., & Sinegub, I.A. (2012). *Ekosistemy akvatoriy morskikh portov Chernomorsko-Azovskogo basseyne (Vvedeniye v ekologiyu morskikh portov) [Ecosystems of marine ports aquatories of the Black-Azov Sea basin (Introduction to the ecology of marine ports)]*. Odessa: Astroprint (in Russ.).
15. Vinogradov, A.K., Bogatova, Yu.I., & Sinegub, I.A. (2014). *Ekologiya morskikh portov (Chernomorsko-Azovskiy basseyne) [Marine ports ecology (the Black-Azov basin)]*. Odessa: Astroprint (in Russ.).
16. Vinogradov, A.K., Bogatova, Yu.I., & Sinegub, I.A. (2018). *Rol' portov i sudokhodstva v formirovani morskikh biot (nepolnosolenyye morya Yevropy) [The role of ports and shipping in the formation of marine biotas (the non-saline seas of Europe)]*. Odessa: Astroprint (in Russ.).

ABIOTIC FEATURES OF SUKHYI AND GRYGORIVSKYI ESTUARIES' ECOSYSTEMS AS SEAPORT WATER AREAS (NORTHWESTERN PART OF THE BLACK SEA)

A. K. Vinogradov, Yu. I. Bogatova, I. A. Synyogub

*Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine,
37, Pushkinska St., 65048 Odesa, Ukraine. bogatovayu@gmail.com*

The article studies the location, origin and abiotic features of the ecosystems of Sukhyi and Grygorivskyi Estuaries that were transformed into water areas of Chornomorsk and Yuzhnyi, the major seaports of Ukraine, in the second half of the 20th century. It also presents a comparison of the abiotic conditions of such ecosystems based on the analysis of published data and additional database materials of the Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine.

The construction of permanent and deep watercourses in the water areas of the estuaries alongside with large-scale dredging works led to their transformation into narrow sea bays with the depths significantly exceeding those in the adjacent sea. The construction of berths included levelling the coastline, changing the bottom profile and increasing the water volumes by more than three times. Now the volumes amount to 45–55 million m³ in Sukhyi Estuary and 60–70 million m³ in Grygorivskyi Estuary. The current abiotic features of the estuaries' ecosystems are determined by the processes occurring in Odesa sea region of the northwestern part of the Black Sea where such estuaries are located. The estuaries' hydrochemical regime depends on the yearly meteorological features, the intensity of water exchange with the sea, the amount of biogenic matter coming from natural (surface runoff, precipitation) and anthropogenic sources and the intra-aquatic processes of new organic matter production and destruction. Dredging activities resulted in emergence of the conditions for halocline and thermocline formation that hamper vertical water exchange. The formation of zones with extreme values of dissolved oxygen was also noted during the research. The maximum values in the surface layers result from photosynthesis development, while the minimum values in the bottom layers are caused by accumulation and destruction of dead organic matter. This information can be used to forecast the consequences arising from similar anthropogenic interference in the functioning of coastal marine ecosystems.

Keywords: Sukhyi and Grygorivskyi Estuaries; seaports; ecosystems; abiotic features; anthropogenic impacts; northwestern part of the Black Sea

Подання до редакції: 02. 06. 2022
Надходження остаточної версії: 15. 06. 2022
Публікація статті: 07. 07. 2022

УДК 551.468.6+556.545, PACS: 92.10.Sx; 92.20.ju; 92.05.Fg

БАЛАНСОВА МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТУ ТА МЕТАБОЛІЗМУ РОЗЧИНЕНИХ ФОРМ АЗОТУ І ФОСФОРУ В СИСТЕМІ ДНІСТРОВСЬКОГО ЛИМАНУ

Ю. П. Ільїн¹, М. А. Берлінський²

¹ Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,
пр. Науки, 37, 03038, Київ, Україна, ypilyin@gmail.com

² Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, nberlinsky@ukr.net

З метою отримання кількісних оцінок потоків води та біогенних речовин в системі Дністровського лиману використано підхід біогеохімічного моделювання, рекомендований міжнародною програмою LOICZ. Інтегральна (резервуарна) модель системи складається з рівнянь балансу води, солоності та розчинених форм азоту і фосфору. Залучено інформацію річного циклу (з листопада 2003 по жовтень 2004 р.) гідрохімічних досліджень у гирлі річки Дністер та на виході з лиману у Чорне море, виконаних в рамках міжнародного проєкту GEF/BSERP, а також гідрометеорологічних спостережень на морській гідрометстанції Білгород-Дністровський, морському гідрометеорологічному пості Царгородське гирло і навчальній базі Одеського державного екологічного університету.

У рівнянні водного балансу враховані потоки річкового стоку, атмосферних опадів та випаровування. Залишено невизначеність, пов'язану з неврахуванням підземного стоку. Застосування незалежної емпіричної оцінки адвективного потоку води через Царгородську протоку дозволило оцінити ступінь нестационарності рівнянь моделі на масштабах мінливості від місяця до року. Потік турбулентного обміну між естуарієм і прилеглим морем оцінюється з рівняння сольового балансу і визначається різницею між солоністю лиманних і морських вод.

Шляхом розрахунку щомісячних і річних величин встановлено, що для Дністровського лиману та подібних систем рівняння балансу води можна вважати стаціонарним, а потоками опадів та випаровування можна знехтувати: у порівнянні з річковим стоком, адвективним і турбулентним потоками водообміну вони на кілька порядків менші, тобто нижче межі похибок горизонтальних потоків води.

Спільна дія адвективного і дифузійного потоків забезпечувала загальний виніс біогенних речовин з екосистеми лиману. За річний цикл спостережень 2003-2004 років 73 % загального розчиненого фосфору та 92 % загального розчиненого азоту надійшло з лиману до моря у порівнянні з кількістю, внесеною до естуарію зі стоком річки Дністер.

Стехіометричний аналіз біогеохімічних залишків показав, що упродовж більшої частини року екосистема Дністровського лиману продукувала органічну речовину і споживала розчинений фосфор, а фіксація азоту в екосистемі переважала денітрифікацію.

Ключові слова: резервуарна модель; бокс-модель; солоність; біогенні речовини.

1. ВСТУП

Одним із секторів, виділених у Додатку XXX Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом та його державами-членами, з іншої сторони, є «Якість води та управління водними ресурсами, включаючи морське середовище». Головними документами стосовно екологічного моніторингу і управління ресурсами поверхневих і підземних вод, включно з річковими, перехідними (транзитними) і морськими водами є Водна рамкова директива та Директива про морську стратегію Європейського Парламенту і Ради Європи. Від-

повідно до цих документів та Водного кодексу України, *перехідні води* – це *поверхневі води у межах гирлової ділянки річки, а також лиманів, де відбувається змішування прісних та солоних вод*. Порядок здійснення державного моніторингу вод, затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 758 від 19 вересня 2018 р., відносить екологічний моніторинг перехідних вод до сфери відповідальності ДСНС України, а саме – мережі гідрометеорологічних обсерваторій, станцій і постів.

Таким чином, стають актуальними питання посилення наукових досліджень відкритих ли-

Чорне море. Експедиційні роботи були організовані та проведені фахівцями Одеської філії Інституту біології південних морів (з 2014 р. – Інститут морської біології) НАН України. Відбір проб води виконувався *щотижнево* у двох пунктах – низов'я р. Дністер (с. Маяки) та гирло лиману (Царгородське гирло, с. Затока) (рис. 1).

Fig. 1 – The scheme of the Dniester estuary and the location of observation points

Визначалися такі показники: температура та солоність (загальна мінералізація для річкової води), водневий показник рН, розчинений кисень, розчинені форми біогенних речовин (амонійний, нітритний, нітратний та загальний азот, фосфатний та загальний фосфор, кременекислота). Крім того, *щомісячно* відбиралися проби для визначення вмісту завислої речовини, валового азоту і фосфору, а також розчиненої і валової органічної речовини (ОР) за перманганатною окиснюваністю у фільтрований та нефільтрований пробах. Вміст завислих фракцій БР та ОР визначався як різниця між їхнім валовим вмістом та вмістом розчинених фракцій [5, 6].

В ході робіт проводився зовнішній лабораторний контроль (інтеркалібрація) методів лабораторного визначення розчинених БР за допомогою сертифікованих зразків, що підтвердило достовірність отриманих натурних даних про БР.

На додаток до масиву гідрохімічних даних по пунктах Маяки й Затока, було створено масив щоденних спостережень за рівнем води і метеорологічними величинами у цих же пунктах (для с. Затока використані дані спостережень морсь-

В основу роботи покладено матеріали досліджень річного циклу (з листопада 2003 по жовтень 2004 р.) мінливості концентрацій та потоків БР в системі р. Дністер – Дністровський лиман –

кого гідрометеорологічного посту (МГП) Царгородське гирло). Крім того, для розрахунку потоків води та речовин у системі використані дані щоденних стандартних спостережень на морській гідрометстанції (МГ) Білгород-Дністровській. Витрати води р. Дністер визначалися за даними щоденних спостережень над рівнем у с. Маяки, за допомогою кривої зв'язку між витратами і рівнем, побудованої за даними вимірювань витрат води на навчальній базі ОДЕКУ (с. Маяки).

2.2 Балансова модель

Результати річного циклу гідрологічних і гідрохімічних спостережень у гирлі р. Дністер, на МГ Білгород-Дністровській і у Царгородському гирлі дозволяють оцінити потоки води і біогенних речовин, необхідні для побудови балансової моделі (бокс-моделі) Дністровського лиману. Відповідно до методичного підходу, рекомендованого в [7, 9] і застосованого для багатьох прибережних зон світу підчас та після закінчення міжнародного проєкту LOICZ (наприклад, [9-12]), інтегровані по об'єму лиману диференціальні рівняння балансу води, солоності та неконсервативної речовини можуть бути записані у наступному вигляді:

$$dV/dt = Vq + Vp - Ve - Vr; \quad (1)$$

$$d(SV)/dt = S(dV/dt) + V(dS/dt) = VqSq - VrSr + Vx(Sr - S); \quad (2)$$

$$d(CV)/dt = C(dV/dt) + V(dC/dt) = VqCq - VrCr + Vx(C - Cr) + \Delta C, \quad (3)$$

де V – об'єм лиману; Vq , Vp , Ve , Vr – об'ємні потоки води, що надходить з річки, з атмосферними опадами, витрачається з випаровуванням та через протоку у відкрите море, відповідно; усі ці потоки можуть бути оцінені за даними вимірювань. Vx – об'ємний потік перемішування, необхідний для замкнення рівнянь балансу пасивної домішки, як консервативної (солоності), так і неконсервативної (біогенних речовин); він знаходиться з рівняння (2) за даними про потоки води (1) і солоності у системі. S , Sq , Sr – солоність води в лимані, гирлі ріки та у протоці відповідно. C , Cq , Cr – концентрації БР в лимані, гирлі ріки і у протоці. ΔC – неконсервативний потік речовини, що визначається біогеохімічними взаємодіями у воді лиману; він має сенс різниці між сумою усіх внутрішніх джерел і сумою усіх внутрішніх стоків речовини (тобто тих, які

не пов'язані з гідрологічними потоками у системі). Він знаходиться з рівняння (3), записаного окремо для кожної БР, що розглядається.

Час оновлення води у лимані розраховується за формулою: $Tr = V / (|Vr| + |Vx|)$ [7, 9].

Серед потоків моделі (1-3) не враховано підземний стік води і біогенних речовин, оскільки синхронні дані про них відсутні. Оцінки [1] показали, що величина підземного стоку води в лиман на порядок менше, ніж річковий стік. Тому залишається пов'язана з цим невизначеність моделі, хоча вона зазвичай не перевищує похибки розрахунку річкового стоку [7].

Блок-схему балансової моделі зображено на рис. 2.

У рівняннях (1-3) Vr може бути задане за даними вимірювань течій у протоці або оцінене безпосередньо з рівняння (1) у наближенні його стаціонарності (тобто, $dV/dt = 0$), як це рекомендовано в [7, 9]. Однак, ми не можемо *a priori* нехтувати змінами об'єму лиману, оскільки коливання рівня води можуть бути співставними з його глибиною (середня глибина 1.6 м). Нажаль, у 2003-2004 рр. прямі вимірювання течій у протоці були неможливі, тому для оцінки адекватного потоку у протоці був застосований наступний підхід.

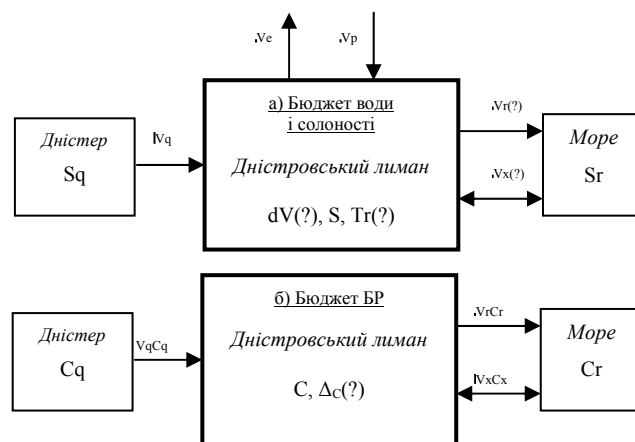


Рис. 2 – Структура бокс-моделі системи Дністровського лиману. Знаком (?) помічені величини, що підлягають визначенню

Fig. 2 – The structure of the box model of the Dniester estuary system. The sign (?) shows the values to be determined

В результаті експедиційних досліджень гідрометеорологічної служби 1979-1987 рр. отримано багато даних вимірювань течій в Царгородському гирлі (1841 вимірювання на розрізі через протоку та 6625 реєстрацій течій на автономній буйковій станції). Було встановлено, що течії у протоці варіюють переважно під впливом стоку р. Дністер і вітрових нагонів, що відтворюється також і в коливаннях рівня води у ли-

мані. На основі цього масиву даних був розроблений емпіричний метод, що дозволяє оцінити результуючий потік у протоці за даними про рівень, виміряний на МГ Білгород-Дністровський (центральна частина лиману) і витрат р. Дністер [13]. Для розрахунку щодобових значень сумарного адвективного потоку у протоці отримане емпіричне рівняння (потоки у $\text{м}^3\text{с}^{-1}$):

$$Vr = Vq - 29.6\Delta h - 6.0, \quad (4)$$

де Δh (см) – зміна середньодобового рівня води між розрахунковою і попередньою добою за даними самописця рівня моря МГ Білгород-Дністровський; Vq – витрати ріки за даними спостережень у с. Маяки за попередню добу (середній час «добігання» річкової води від гирла ріки до виходу з лиману оцінюється в 1 добу). Було показано, що даний підхід забезпечує прийнятну похибку оцінки результуючого адвективного потоку у Царгородському гирлі з імовірністю 96%. Таким чином, за допомогою формули (4) були розраховані щодобові значення Vr , у тому числі і для усіх дат щотижневого відбору проб на гідрохімічні величини. Завдяки такому підходу вдалося не вдаватися до припущення щодо стаціонарності рівняння (1) і оцінити величини часових варіацій об'єму Дністровського лиману.

Усі подальші обрахунки проводилися за до-

помогою програми, створеної в середовищі електронних таблиць EXCEL з метою оцінки середньомісячних та річних величин потоків, солоності та концентрацій розчинених БР. Потоки атмосферних опадів та випаровування отримані за даними метеорологічних спостережень на МГ Білгород-Дністровський.

Величини dV/dt , знайдені з рівняння (1), використовувалися для розрахунку потоку турбулентного перемішування Vx з рівняння (2), де солоність у гирлі ріки Sq оцінювалася за вимірюваннями у с. Маяки; у протоці Царгородське гирло – за даними спостережень у с. Затока; солоність води лиману – за даними МГ Білгород-Дністровський. Площа Дністровського лиману прийнята рівною 408 км^2 , об'єм – $0,733 \text{ км}^3$ у відповідності до [2].

Слід зазначити, що, на відміну від детальних чисельних моделей на основі систем диференціальних рівнянь руху води, перенесення та еволюції речовин (наприклад, [14]), балансові моделі мають обмежені можливості застосування для завдань прогнозування, управління морськими об'єктами (зокрема лиманами) та гідротехнічного будівництва. Але вони значно простіші для аналізу інтегральних показників стану екосистеми, набагато дешевші у реалізації і дозволяють коректно організовувати та інтерпретувати дані спостережень.

Таблиця 1 – Місячні та річні оцінки солоності і складових водного балансу у системі Дністровського лиману за даними спостережень 2003-2004 років

Table 1 – Monthly and annual estimates of salinity and water balance components in the Dniester estuary system according to observations of 2003-2004

Місяць	Sq	S	Sr	Vq	Vr	Vp	Ve	dV	Vx	Tr
	‰			км^3						дні
XI	0,65	2,55	15,81	0,903	0,820	0,010	0,007	0,076	0,939	12,4
XII	0,5	2,18	8,89	0,852	0,853	0,011	0,008	0,002	1,027	12,1
I	0,48	2,62	11,93	0,975	0,979	0,038	0,010	0,024	1,245	10,2
II	0,5	2,35	15,03	0,922	0,817	0,008	0,009	0,104	0,936	12,1
III	0,51	1,91	9,01	1,027	1,077	0	0,013	-0,063	1,230	9,9
IV	0,45	0,82	5,08	1,092	1,040	0	0,038	0,014	0,940	11,1
V	0,41	0,80	3,08	1,263	1,246	0,045	0,041	0,022	1,457	8,4
VI	0,38	1,37	7,89	0,951	0,988	0	0,052	-0,089	1,185	10,1
VII	0,43	1,90	6,83	0,846	0,831	0,033	0,043	0,005	1,158	11,4
VIII	0,38	0,52	3,64	1,079	1,028	0,007	0,054	0,004	0,745	12,8
IX	0,41	1,62	13,13	0,835	0,838	0,011	0,048	-0,041	0,990	12,0
X	0,41	0,92	8,21	0,816	0,838	0,011	0,016	-0,027	0,824	13,7
Середнє	0,46	1,63	9,04	-	-	-	-	-	-	11,4
Сума	-	-	-	11,558	11,363	0,174	0,339	0,030	12,676	-

3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Водний і сольовий бюджети

Результати розрахунку місячних і річних значень складових водного і сольового бюджетів Дністровського лиману представлені у табл. 1.

З цієї таблиці видно, що місячні і річні значення Vq , Vr і Vx є співставними величинами, а інші потоки – на 1-3 порядки меншими. Таким чином, при розрахунках сезонних і міжрічних змін водного і сольового балансів Дністровського лиману, потоки опадів та випаровування можна не враховувати, як і флуктуації об'єму (рівня води) системи. Останнє означає, що на річному і місячному (сезонному) масштабах мінливості рівняння водного балансу для системи Дністровського лиману та аналогічних систем мілких безприпливних естуаріїв може бути прийняте стаціонарним. У травні спостерігався абсолютний максимум притоку річкової води, її витоку через гирло лиману та турбулентного обміну з водою прилеглого моря, а також абсолютний мінімум солоності води у Царгородському гирлі.

На цей же місяць припадає мінімальний час оновлення води лиману (8,4 днів) завдяки інтенсивній промивці системи річковим стоком. Середнє за річний цикл значення цього показника 11,4 днів.

3.2 Бюджети біогенних речовин

Використовуючи величини середньомісячних потоків (табл. 1), отриманих за даними спостережень та з рівнянь «гідрологічного» бюджету (1, 2), можна визначити складові бюджету речовини, а потім і залишковий член ΔC , з рівняння (3) для кожної БР, що досліджується. Оскільки гідрохімічні спостереження у центральній частині лиману не проводилися, величини C оцінювалися як середньоарифметичні з концентрацій у гирлі річки та протоці: $C = (Cq + Cr) / 2$.

У табл. 2, 3 представлені результати оцінки місячних і річних величин складових бюджету розчинених фракцій фосфору і азоту.

Відповідно до прийнятої термінології LOICZ, загальний (розчинений) фосфор TDP – це сума розчиненого неорганічного фосфору (фосфатів) і розчиненого органічного фосфору: $TDP = DIP + DOP$; загальний (розчинений) азот – це сума розчиненого неорганічного азоту (амонійний + нітритний + нітратний) і розчиненого органічного азоту: $TDN = DIN + DON$. У даному випадку концентрації TDP і TDN – величини, що вимірювалися, як і DIP та DIN . Табл. 2, 3 містять також по два додаткові стовпчики, у яких подані відносні величини залишкового члена рівняння балансу та сумарного виносу розчиненої БР у море у порівнянні з найбільш значним членом – надходженням речовини з річковим стоком (у відсотках):

Таблиця 2 - Місячні та річні оцінки складових бюджету загального розчиненого фосфору у воді Дністровського лиману за даними спостережень 2003-2004 років

Table 2 – Monthly and annual estimates of the total dissolved phosphorus budget components in the Dniester estuary water according to observations of 2003-2004

Місяць	$D(VC)$	$VqCq$	$VrCr$	$Vx(C-Cr)$	ΔC	Залишок	Винос
	Тони					%	
XI	3,626	90,663	40,871	20,723	-25,4415	-28,1	67,9
XII	15,177	112,321	68,717	42,940	14,51299	12,9	99,4
I	-6,542	111,471	94,894	23,915	0,796065	0,7	106,6
II	2,684	110,938	28,048	35,468	-44,738	-40,3	57,3
III	-16,077	101,167	20,312	49,100	-47,9231	-47,4	68,5
IV	-10,410	67,901	11,462	21,586	-45,2639	-66,7	48,7
V	3,062	100,962	21,343	45,400	-31,1566	-30,9	66,1
VI	5,383	89,300	46,358	33,753	-3,80564	-4,3	89,7
VII	3,071	87,067	18,903	48,887	-16,2045	-18,6	77,9
VIII	12,715	137,163	35,886	35,179	-53,383	-38,9	51,8
IX	1,727	101,106	23,830	37,014	-38,5352	-38,1	60,2
X	-2,569	100,681	52,327	24,407	-26,5158	-26,3	76,2
Середнє	-	-	-	-	-	-27,2	72,5
Сума	11,847	1210,739	462,952	418,282	-317,658	-	-

$$\text{Залишок} = 100\Delta_C / VqCq;$$

$$\text{Винос} = 100[VrCr + Vx(C - Cr)] / VqCq.$$

У нижньому рядку цих стовпчиків дані середньорічні величини *Залишку* і *Виносу*.

Інтерпретація неконсервативних (залишкових) складових балансу БР може бути зроблена за допомогою стехіометричного аналізу LOICZ [7, 9].

Кількість загального розчиненого фосфору, що надходить у сумі за рік до лиману з річковою водою, складає 1,21 тисяч тон, а сумарний винос до прилеглого моря за рахунок процесів адвекції і турбулентного перемішування $0,46 + 0,42 = 0,88$ тисяч тон за рік (у середньому, 72,5 % від річкового надходження).

Близько 0,32 тисяч тон ($1,02 \cdot 10^{10}$ моль) *TDP* витрачається за рік у лимані, беручи участь у сумарному (органічному) метаболізмі екосистеми (СМЕ). Від'ємна величина залишкового члена означає, що екосистема є виробником органічної речовини і споживачем *TDP*.

Величина СМЕ апроксимується різницею між первинною продукцією і респірацією (*p-r*). Зі співвідношення Редфілда між вуглецем і фосфором (*C:P*) = (106:1) ця різниця може бути оцінена величиною (*p - r*) = $-106\Delta_{TDP} = 1,08 \cdot 10^{12}$ моль вуглецю за рік.

Таким чином, первинна продукція органічної речовини у Дністровському лимані набагато більша, ніж респірація.

Кількість загального розчиненого азоту, що надійшов протягом року до лиману з річковим стоком, складає 32,14 тисяч тон, а сумарний винос у море за рахунок процесів адвекції і турбулентного перемішування $24,57 + 5,52 = 30,09$ тисяч тон за рік (у середньому, 91,5 % від річкового надходження).

Близько 3,88 тисяч тон ($5,44 \cdot 10^{10}$ моль) *TDN* витратилося за рік у лимані (неконсервативний залишок від'ємний). Величина метаболізму азоту в екосистемі, яка є різницею між фіксацією азоту і денітрифікацією (*nfix - denit*), може бути оцінена як різниця між спостереженим і розрахованим значеннями Δ_{TDN} . Останнє знаходиться по формулі $\Delta_{TDN}^{exp} = \Delta_{TDP}(N:P)$, де (*N:P*) = (16:1) – співвідношення Редфілда між азотом і фосфором. Таким чином, отримаємо: $\Delta_{TDN}^{exp} = -16,32 \cdot 10^{10}$ моль/рік; (*nfix-denit*) = $(-5,44 - (-16,32)) \cdot 10^{10} = 1,088 \cdot 10^{11}$ моль азоту за рік. Це означає, що у сумі за річний цикл спостережень у Дністровському лимані процес фіксації азоту превалював над процесом денітрифікації, внаслідок чого утворилося 7,771 тисяч тон фіксованого азоту.

Таблиця 3 - Місячні та річні оцінки складових бюджету загального розчиненого азоту у воді Дністровського лиману за даними спостережень 2003-2004 років

Table 3 – Monthly and annual estimates of the total dissolved nitrogen budget components in the Dniester estuary water according to observations of 2003-2004

Місяць	<i>d(VC)</i>	<i>VqCq</i>	<i>VrCr</i>	<i>Vx(C-Cr)</i>	Δ_C	Залишок	Винос
	Тони					%	
XI	346,040	4117,345	3795,469	65,491	89,655	2,2	93,8
XII	-1436,780	2263,339	3270,996	84,947	-344,176	-15,2	148,3
I	73,344	3625,233	3201,075	724,997	374,182	10,3	108,3
II	-554,220	2235,227	994,668	510,190	-1284,59	-57,5	67,3
III	-10,005	2992,835	1008,515	1179,842	-814,483	-27,2	73,1
IV	155,326	2658,009	1204,049	539,727	-758,907	-28,6	65,6
V	336,381	3790,893	3312,312	629,469	487,269	12,9	104,0
VI	29,042	3250,361	3499,426	284,077	562,185	17,3	116,4
VII	-840,794	1588,769	1104,586	364,583	-960,394	-60,4	92,5
VIII	-43,262	1867,093	1686,181	141,741	-82,434	-4,4	97,9
IX	12,004	1603,561	571,405	342,363	-677,790	-42,3	57,0
X	99,385	2146,413	918,556	654,849	-473,622	-22,1	73,3
Середнє	-	-	-	-	-	-17,9	91,5
Сума	-1833,539	32139,078	24567,239	5522,274	-3883,10	-	-

4. ВИСНОВКИ

З метою отримання коректних кількісних оцінок потоків води та біогенних речовин в системі Дністровського лиману використано підхід біогеохімічного моделювання, рекомендований програмою LOICZ. Інтегральна (резервуарна) модель системи складається з рівнянь балансу води, солоності та розчинених форм азоту і фосфору.

Залучено інформацію річного циклу (з листопада 2003 по жовтень 2004 р.) гідрохімічних досліджень у гирлі річки Дністер та на виході з лиману у Чорне море, виконаних в рамках міжнародного проєкту GEF/BSERP, а також гідрометеорологічних спостережень на МГ Білгород-Дністровський, МГП Царгородське гирло і навчальній базі ОДЕКУ.

У рівнянні водного балансу враховані потоки річкового стоку, атмосферних опадів та випаровування. Залишено невизначеність, пов'язану з неврахуванням підземного стоку, яка *a priori* вважається меншою за похибку розрахунку річкового стоку.

Застосування незалежної емпіричної оцінки адвективного потоку води через Царгородську протоку дозволило оцінити ступінь нестационарності рівнянь моделі на масштабах мінливості від місяця до року.

Потік турбулентного обміну між естуарієм і прилеглим морем оцінюється шляхом обернення рівняння сольового балансу і визначається різницею між солоністю лиманних і морських вод.

Шляхом розрахунку щомісячних і річних величин встановлено, що для Дністровського лиману та подібних систем рівняння балансу води можна вважати стаціонарним, а потоками опадів та випаровування можна знехтувати: у порівнянні з річковим стоком, адвективним і турбулентним потоками водообміну вони на кілька порядків менші, тобто нижче межі похибок горизонтальних потоків води.

Спільна дія адвективного і дифузійного потоків протягом року забезпечувала загальний вивід біогенних речовин з екосистеми лиману.

Оцінки місячних і річних величин складових балансу біогенних речовин в системі «Дністер – Дністровський лиман – Чорне море» дозволяють коректно оцінити показники транспорту БР та біогеохімічні залишки, як наслідки внутрішніх взаємодій в екосистемі лиману.

За річний цикл спостережень 2003-2004 років 73 % загального розчиненого фосфору та 92 % загального розчиненого азоту надійшло з лиману до моря у порівнянні з кількістю, внесеною до

естуарію зі стоком річки Дністер.

Стехіометричний аналіз біогеохімічних залишків на основі співвідношень Редфілда показав, що упродовж більшої частини року екосистема Дністровського лиману продукувала органічну речовину і споживала розчинений фосфор, а фіксація азоту в екосистемі переважала денітрифікацію.

Наведені таблиці щомісячних та річних оцінок складових балансів води, солей, розчинених форм фосфору та азоту можуть у подальшому служити базою для порівняння результатів і вдосконалення діючої системи моніторингу перехідних вод, що продукуються і постачаються в Чорне море гирловою областю Дністра.

ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку всім учасникам експедиційних та лабораторних досліджень, завдяки яким стала можливою дана робота, а також шановним рецензентам за цінні зауваження щодо назви і тексту статті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья : монография. Киев: Наук. думка, 1990. 240 с.
2. Шуйский Ю. Д. Физическая география устьевой области Днестра : монография. Одесса: Астропринт, 2013. 328 с.
3. Исследования поступления биогенных веществ в Черное море с речным стоком в рамках международного проекта BSERP/GEF / Ильин Ю. П., Репетин Л. Н., Морозов В. Н. и др. *Екологічні проблеми Чорного моря*: зб. матеріалів до 6-го Міжнародного Симпозіуму, 11-12 листопада 2004 р., м. Одеса. Одеса: ОЦНТЕІ, 2004. С. 198-202.
4. Ilyin Y. P., Berlinskiy N. A. Nutrients input from the riverine sources to the Black Sea by direct measurements. *Abstracts of 1st Biannual Scientific Conference "Black Sea Ecosystem 2005 and Beyond" (8-10 May 2006, Istanbul, Turkey)*. Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution, 2006. Pp. 142-143.
5. Многолетняя изменчивость биогенного стока Днестра / Берлинский Н. А. и др. *Еколого-економічні проблеми Днестра*: зб. научн. статей / отв. ред. В.М. Небрат. Одесса: ИНВАЦ, 2006. С. 12-15.
6. Многолетняя изменчивость стока биогенных веществ Днестра / Гаркавая Г. П., Богатова Ю. И., Берлинский Н. А. и др. *Водные ресурсы*. 2008. Т. 35. № 6. С. 1-8.
7. LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines / Gordon

- D.C. Jr. et al. *LOICZ Research & Studies*. 1996. 5. VI+96 pp.
8. Murray J. W. Chapter 2: Mass Balance - The Cornerstone of Chemical Oceanography. *University of Washington, Lecture notes*. 2004. 27 p. https://www.ocean.washington.edu/courses/oc400/Lecture_Notes/CHPT2.pdf
 9. *Proceedings of the LOICZ Workshop on biogeochemical budget methodology and applications*. Providence, Rhode Island, November 9-10, 2007. LOICZ Research & Studies / Edited by Swaney D. P., Giordani G. 2011. 37. 195 p.
 10. The fate of phosphorus in the Yangtze (Changjiang) Estuary, China, under multi-stressors: Hindsight and forecast / Xu, H., et al. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2015. 163. Pp. 1-6.
 11. Kiwango H., Njau K. N., Wolanski, E. The application of nutrient budget models to determine the ecosystem health of the Wami Estuary, Tanzania. *Ecohydrology & Hydrobiology*. 2018. 18 (2). Pp.107-119.
 12. Ilyin Yuriy. Estimation of nutrients transport and metabolism in the Dnipro-Bug estuarine system based on data of the EMODNet Chemistry project. *EMODnet Open Conference*, Online, 14-16 June 2021. E-poster, 2021. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10747.44324>
 13. Уточнить параметры водо-, соле- и теплообмена через Кинбурнский и Цареградский проливы, а также водообмена внутри дельты Днепра, в современных условиях и при различных объемах изъятия стока / Симов В. Г., Морозов В. Н., Миньковская Р. Я. и др. Промежуточный отчет по теме НИР № II.16a.13. Рукопись: Научный фонд МО УкрГМИ: Севастополь, 1989. 262 с.
 14. Тучковенко Ю. С., Тучковенко О. А. Модель эвтрофикации морских и лиманских экосистем северо-западного Причерноморья. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 21. С. 75-89. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.08>
- REFERENCES**
1. Timchenko, V.M. (1990). *Ekologo-gidrologicheskie issledovaniya vodoemov Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya* [Environmental and hydrologic studies of water ponds on the North-Western Black Sea shores]. Kiev: Naukova Dumka. (in Russ.)
 2. Shuiskiy, Yu.D. (2013). *Fizicheskaya geografiya ustyevoy oblasti Dnestra* [Physical geography of the Dniester mouth area]. Odessa: Astroprint. (in Russ.)
 3. Ilyin, Yu.P. et al. (2004). Issledovaniya postupleniya biogennykh veshchestv v Chernoe more s rechnym stokom v ramkakh mezhdunarodnogo proekta BSERP/GEF [Studies of nutrients input to the Black Sea with riverine discharge in the international project BSERP/GEF frameworks]. *Environmental problems of the Black Sea: Proc. of 6th International Symposium, 11-12 November, 2004, Odessa, Ukraine*. Odessa: OCSTI, pp. 198-202. (in Russ.)
 4. Ilyin, Y.P. & Berlinskiy, N.A. (2006). Nutrients input from the riverine sources to the Black Sea by direct measurements. *Abstracts of 1st Biannual Scientific Conference "Black Sea Ecosystem 2005 and Beyond" (8-10 May 2006, Istanbul, Turkey)*. Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution, pp. 142-143.
 5. Berlinsky, N.A. et al. (2006). Mnogoletniaya izmenchivost' biogennogo stoka Dnestra [Long-term variability of the Dniester River nutrients discharge]. *Ekologo-economicheskie problemy Dnestra: sb. nauch. statey [Environmental and economic problems of the Dniester River: collected papers]*. Edited by V.M. Nebrat. Odessa: INVAC, pp. 12-15. (in Russ.)
 6. Garkavaya, G.P. et al. (2008). Mnogoletniaya izmenchivost' biogennogo stoka Dnestra [Multi-annual variability of nutrients discharge of the Dniester River]. *Vodnye resursy [Water resources]*, 35 (6), pp. 1-8. (in Russ.)
 7. Gordon, D.C. Jr. et al. (1996). LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. *LOICZ Research & Studies*, 5, VI+96 pp.
 8. Murray, J.W. (2004). Chapter 2: Mass Balance - The Cornerstone of Chemical Oceanography. *University of Washington, Lecture notes*. https://www.ocean.washington.edu/courses/oc400/Lecture_Notes/CHPT2.pdf
 9. Swaney, D.P., & Giordani, G. (eds). (2011). *Proceedings of the LOICZ Workshop on biogeochemical budget methodology and applications*. Providence, Rhode Island, November 9-10, 2007. LOICZ Research & Studies, 37.
 10. Xu, H. et al. (2015). The fate of phosphorus in the Yangtze (Changjiang) Estuary, China, under multi-stressors: Hindsight and forecast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163, pp. 1-6.
 11. Kiwango, H., Njau, K.N. & Wolanski, E. (2018). The application of nutrient budget models to determine the ecosystem health of the Wami Estuary, Tanzania. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18 (2), pp. 107-119.
 12. Ilyin, Yuriy. (2021). Estimation of nutrients transport and metabolism in the Dnipro-Bug estuarine system based on data of the EMODNet Chemistry project. *EMODnet Open Conference*, Online, 14-16 June 2021. E-poster. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10747.44324>
 13. Simov, V.G. et al. (1989). *To specify the parameters of water, salt and heat exchange through the Kinburn and Tsargorod straits, as well as water exchange inside the Dnieper delta, for the modern conditions and at the different volumes of discharge withdraw*. Interim report on the research study No. II.16a.13. Sevastopol: Manuscript. Sci. fund of MB UHMI. 262 p. (in Russ.)
 14. Tuchkovenko, Yu.S., Tuchkovenko, O.A. (2018). The model of eutrophication of marine and estuarine ecosystems in the Northwest Black Sea region. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 21, pp. 75-89. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.08>

BALANCE MODEL OF DISSOLVED NITROGEN AND PHOSPHORUS TRANSPORTATION AND METABOLISM IN THE DNIESTER ESTUARY SYSTEM

Yu. P. Ilyin¹, N. A. Berlinsky²

¹ Ukrainian Hydrometeorological Institute,
Pr. Nauky, 37, 03038, Kyiv, Ukraine, ypilyin@gmail.com

² Odessa State Environmental University,
Lvivs'ka St., 15, 65016, Odesa, Ukraine, nberlinsky@ukr.net

In order to obtain quantitative estimates of water and nutrient fluxes into the Dniester estuary system, the biogeochemical modeling approach recommended by the international program LOICZ was used. The integral (reservoir) model of the system consists of balance equations for water, salinity and dissolved forms of nitrogen and phosphorus. The research involves the information of the annual cycle (from November 2003 to October 2004) of hydrochemical studies at the mouth of the Dniester River and at the exit of the estuary to the Black Sea carried out within the framework of the international project GEF/BSERP, as well as the data of hydrometeorological observations at Belgorod-Dniestrovsky hydrometeorological station, Tzargorod Gyrlo hydrometeorological post and Odesa State Environmental University training base.

The water balance equation takes into account the flows of river runoff, precipitation and evaporation. Uncertainty associated with the failure of taking into account the underground runoff still remained. The use of an independent empirical assessment of the advective water flow through the Tzargorod Strait made it possible to estimate the degree of non-stationarity of the model equations on the scale of variability from a month to a year. The flow of turbulent exchange between the estuary and the adjacent sea is estimated by means of the salt balance equation and is determined by the difference between the estuary and marine water salinity.

By calculating the monthly and yearly values it was established that, for the Dniester estuary and similar systems, the water balance equation can be considered as stationary while the precipitation and evaporation flows can be neglected: compared to the river runoff, advective and turbulent water exchange flows they are several orders of magnitude lower, that is, below the limit of errors of horizontal water flows.

The joint action of the advective and diffusion flows ensured the overall removal of nutrients from the estuary ecosystem. During the annual cycle of 2003-2004 observations 73% of total dissolved phosphorus and 92% of total dissolved nitrogen entered the sea from the estuary compared to the amount reaching the estuary with the Dniester River runoff.

Stoichiometric analysis of biogeochemical residuals showed that, for most of the year, the ecosystem of the Dniester estuary produced organic matter and consumed dissolved phosphorus, while the nitrogen fixation in the ecosystem outweighed the denitrification process.

Keywords: reservoir model, box-model, salinity, nutrients.

Подання до редакції : 09. 02. 2022

Надходження остаточної версії : 09. 05. 2022

Публікація статті : 07. 07. 2022

УДК 551.468.4

МОДЕЛЮВАННЯ МІНЛИВОСТІ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУЗЛІВСЬКОЇ ГРУПИ ЛИМАНІВ ЗА РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ЇХ ВОДООБМІНУ З МОРЕМ

Ю. С. Тучковенко, Д. В. Кушнір

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, tuch2001@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

Стаття присвячена вирішенню проблеми стабілізації гідрологічного режиму і гідроекологічного стану групи Тузлівських лиманів, розташованих в центральній частині Дунай-Дністровського межиріччя, шляхом забезпечення та регулювання їх водообміну з відкритим морем через штучно створені канали у косі-пересипу, що відділяє водойму від моря. Наведені результати адаптації відомої сучасної чисельної гідродинамічної моделі Delft3D Flow Flexible Mesh до умов лиманів Тузлівської групи, а також застосування її для визначення ефективності різних варіантів забезпечення водообміну з морем на підставі результатів сценарного математичного моделювання. Зокрема, досліджені варіанти функціонування: (1) відносно вузького з'єднувального каналу на 2-му км коси-пересипу (л. Бурнас) сумісно з широкою і глибокою прорвою, яка існувала до 2015 р. на 24-му км коси-пересипу (л. Шагани); (2) широкого контрольованого з'єднувального каналу в л. Шагани на місці прорви, разом із вищезазначеним каналом в л. Бурнас; (2) додаткового (третього) вузького каналу на ділянці коси пересипу прилеглої до л. Алібей. Як індикатор ефективності управлінських рішень щодо забезпечення стабільності гідроекологічних умов в лиманах використовуються характеристики річного циклу просторово-часової мінливості солоності води. На підставі аналізу результатів сценарного моделювання зроблений висновок, що оптимальне вирішення проблеми стабілізації гідроекологічного режиму водойми полягає в забезпеченні постійного протягом року різноспрямованого водообміну з морем через два штучних з'єднувальних канали в косі-пересипу з відмітками дна мінус 1,0 м БС, шириною 60 м – для л. Шагани та 15 м – для л. Бурнас. В цьому випадку не буде відбуватись засолення водойми у багаторічній перспективі. Визначений час повного водооновлення морською водою основних лиманів Тузлівської групи, який у вказаному варіанті буде дорівнювати 8 місяців для лиману Шагани і 12 місяців для лиманів Алібей і Бурнас.

Ключові слова: Тузлівські лимани; солоність вод; водообмін з морем; сценарне моделювання; водооновлення

1. ВСТУП

Тузлівська група лиманів розташована в центральній частині Дунай-Дністровського межиріччя. Вона утворилась в результаті затоплення морем низьких ділянок суші, і, в подальшому, була відокремлена від моря піщаним пересипом – баром. У складі Тузлівської групи лиманів виділяють 3 основних («первинних») лимани: Шагани, Бурнас, Алібей, а також ряд «вторинних» (рис. 1). Всі вони можуть бути об'єднані в такі 3 групи: 1) **Шагани** + Будури + Магалецький + Мартаза; 2) **Алібей** + Карачаус + Хаджидер; 3) **Бурнас** + Курудіол + Солоний. Так як основні лимани Шагани, Бурнас і Алібей сполучені між собою широкими протоками і відокремлені від моря однією загальною косою-пересипом, то вони розглядаються як єдиний

лиманий комплекс. Довжина пересипу, що відокремлює лимани від моря становить 29 км, ширина змінюється від 60 до 400 м.

Історично Тузлівські лимани використовувались для рибного промислу, видобутку поваренної солі, відпочинку та лікування (бальнеології). Як водно-болотні екосистеми, Тузлівські лимани відігравали важливу екологічну роль для збереження та відтворення біологічного різноманіття, особливо коловодних птахів під час їх міграції, гніздування та зимівлі, а також чорноморської іхтіофауни.

У 1995 році систему лиманів «Шагани-Алібей-Бурнас» Постановою Кабінету Міністрів України від 23.11.1995 року №935 було включено до переліку водно-болотних угідь міжнародного значення на підставі критеріїв Рамсарської

конвенції. В 2010 р. Указом Президента України №1/2010, з метою збереження, відтворення та раціонального використання унікальних природних комплексів водно-болотних угідь міжнародного значення як середовища існування водоплавних птахів, а також об'єктів північного Причорномор'я, що мають важливе природоохоронне, наукове, історико-культурне, естетичне, рекреаційне та оздоровче значення, був створений національний природний парк «Тузлівські лимани». Загальна площа парку становить 27865,00 га, з якої на водні акваторії лиманів припадає близько 82 %. У 2016 р. територія національного парку увійшла до складу Смарагдової мережі Європи як об'єкт «Tuzlivski limany» №UA0000140.

Стан природних ресурсів Тузлівської групи лиманів та їх використання визначаються наявністю зв'язку з морем через природні прорви-промоїни, які можуть створюватись в косі-пересипу під дією штормів, або через штучно створені канали. Річний прісний баланс Тузлівських лиманів є від'ємним через значне перевищення його витратної складової над прибутковою. У разі, якщо цей дефіцит водних ресурсів не компенсується надходженням морських вод, відбувається обміління та осолонення лиманів.

Відомо, що в XIX ст., коли лимани були довгий час ізольовані від моря, і солоність вод в них досягала 200 ‰, на їхній акваторії здійснювався видобуток солі. При катастрофічному падінні рівня води в 1868-1869 рр. Тузлівські лимани перетворилися на гіпергалинні болотні солонці [1, 2]. За свідченням [3], в умовах повної відсутності водообміну з морем, обміління та висихання лиманів відбувається протягом 3-4 років.

У XX столітті в Тузлівських лиманах активно здійснювався рибний промисел, якому сприяв режим сталого водообміну лиманів з прилеглою морською акваторією через штучно створені в Тузлівській косі обловно-запускні канали. Канали застосовувались для запуску весною в лиман молоді риб (насамперед кефалевих) з прилеглої частини моря для нагулу. Восени, коли лиманні води охолоджуються швидше за морські, в каналах здійснювався вилов риби, яка прагнула вийти в море. За свідченням [4], з 1953 по 1990 рр. в косі постійно діяли від 2 до 5 таких каналів, які забезпечували стабільний та сприятливий для рибогосподарської діяльності гідролого-гідрохімічний режим. З 1992 по 1997 рр. канали не працювали.

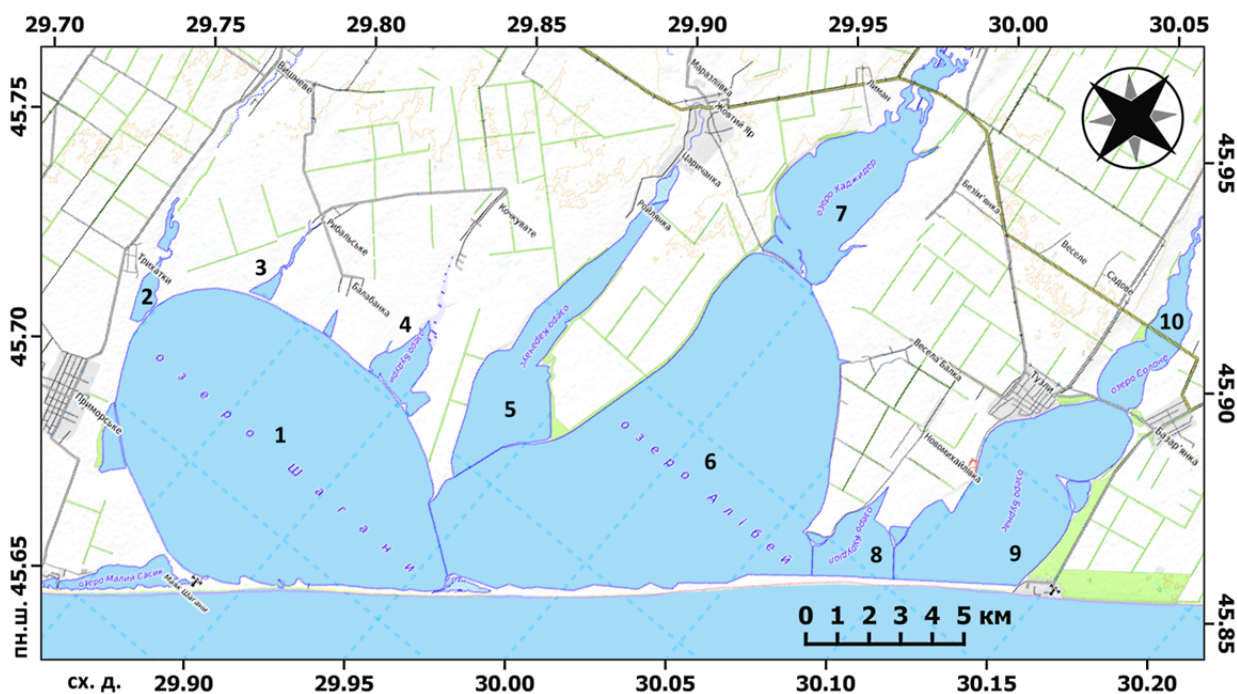


Рис. 1 – Схема розташування лиманів Тузлівської групи: 1 – л. Шагани з лиманами Магалецький (2), Мартаза (3) та Будури (4); 5 – л. Карачаус; 6 – л. Алібей; 7 – л. Хаджидер; 8 – л. Курудіол; 9 – л. Бурнас; 10 – л. Солоний (Базар'ян)

Fig. 1 – Map that shows the location of the Tuzla group of lagoons: 1 – the Shahany Lagoon with adjoining Mahalevskiy (2), Martaza (3) and Budury Lagoons (4); 5 – the Karachaus Lagoon; 6 – the Alibey Lagoon; 7 – the Khadzhyder Lagoon; 8 – Lake Kurudiol; 9 – Lake Burnas; 10 – the Solonyi Lagoon (Lake Bazaryan)

В Одеському державному екологічному університеті (ОДЕКУ) у 2003-2005 рр. було виконано ряд науково-дослідних робіт, а саме «Розробка заходів щодо відновлення і підтримання сприятливих гідрологічного і гідрохімічного режимів в районі Тузлівської групи лиманів» [5], «Моделювання гідрологічного і гідрохімічного режимів Тузлівської групи лиманів, спрямованих на покращення їх екологічного стану» [6], на яких базуються публікації [7-11], а також проведені відповідні дослідження у 2014 р. [12]. Було встановлено, що головною гідроекологічною проблемою для вказаного лиманного комплексу є обміління і підвищення солоності вод до критичних значень в умовах відсутності або обмеженого водообміну з морем, що негативно впливає на біорізноманіття екосистеми та її біологічну продуктивність. Осолонення водойми призводить до перебудови біоценозів, докорінної зміни якісних і кількісних характеристик всіх складових кормової бази, збідніння видового складу іхтіофауни і зменшення рибопродуктивності [13].

Узагальнені відомості щодо мінливості солоності вод в лиманах Тузлівської групи у ХХІ ст. наведені в роботі [14]. У період 2007-2009 рр., за відсутності зв'язку лиманів з морем, солоність вод в лиманах Шагани і Алібей досягала 46-54 ‰, а в лимані Бурнас у серпні становила 68-88 ‰ [15].

У 2010 р., на місці спочатку невеликого, штучно створеного каналу на 24 км коси-пересипу (л. Шагани), утворилась широка та глибока прорва-промоїна. Утворення прорви призвело до значного зниження солоності води в лиманах. Наприклад, у вересні 2010 р. в л. Бурнас рівень води підвищився на 0,85 м, а солоність води знизилась до 46-54 ‰ [15]. У 2015 р. прорва на 24-му кілометрі коси-пересипу була штучно перекрита. З цього часу зв'язок водойми з морем підтримувався через створений на 2-му кілометрі коси-пересипу (л. Бурнас) штучний обводно-запускний канал з проєктною шириною 15,0 м і відміткою дна мінус 1,0 м БС, який функціонував протягом декількох місяців навесні і восени. За свідченням [14], солоність вод наприкінці серпня-початку вересня 2020 р. дорівнювала 47-65 ‰ в л. Шагани, 60-63 ‰ – в л. Алібей та 44-64 ‰ – в л. Бурнас.

Зауважимо, що 2019-2020 рр. були дуже посушливими, з малою кількістю атмосферних

опадів і інтенсивним випаровуванням, а пропускна здатність каналу значно знижувалась через його замулення, а також наявність та особливості конструкції встановлених в ньому стаціонарних риболовецьких гард.

Режим рибогосподарського використання Тузлівської групи лиманів, який склався історично, полягав у штучному створенні в пересипу кількох каналів для з'єднання водойми з морем, які відкривались навесні – для зариблення і восени – для вилову товарної риби. За результатами досліджень ОДЕКУ, в роботах [5, 7, 10-12] був зроблений висновок, що в кліматичних умовах ХХ ст. такий режим був виправданим. Через канали відбувалось штучне наповнення водойми морською водою, що призводило до відносного зниження солоності вод в лиманах та забезпеченню в них сприятливих гідроекологічних умов.

Однак, зміна кліматичних умов (посилення посушливості клімату, збільшення дефіциту прісного водного балансу), які відбуваються в останні десятиріччя [16, 17], призвела до того, що традиційна система регулювання водообміну Тузлівської водойми з морем має наслідком формування багаторічної тенденції накопичення солей в лиманах та підвищення солоності води в них. В цьому контексті особливої актуальності набуває висновок, зроблений в [5] на підставі досліджень 2003 р.: необхідно забезпечити не тільки поповнення лиманів морською водою навесні і восени кожного року, але й забезпечити виведення солей з лиманів до моря, тобто щоб морська вода не тільки надходила до водойми, а й лиманні води виводились до моря. На підставі результатів математичного моделювання, із використанням гідродинамічної моделі МЕССА [5] було встановлено, що для забезпечення максимального промивання Тузлівської водойми морськими водами оптимальним є створення двох сполучних каналів в південній (л. Шагани) і північній (л. Бурнас) частинах піщаної коси-пересипу. Моделювання виконувалось за вітрових умов, які спостерігались у 2002 році на гідрометеорологічній станції Усть-Дунайськ. Відмітки рівня води в каналах з боку моря задавались на підставі результатів моделювання або незмінними [10-12].

З моменту отримання вищезгаданих результатів минуло багато часу, але проблема стабілізації гідрологічного режиму і гідроекологічних

умов в Тузлівській групі лиманів, шляхом забезпечення і регулювання їх водообміну з прилеглою частиною моря, досі остаточно не вирішена. За цей час були отримані нові, уточнені дані щодо просторового розподілу глибин в Тузлівських лиманах, змінювались умови їх водообміну з морем, значного розвитку здобули чисельні гідродинамічні моделі, які застосовуються для сценарного моделювання. Тому було прийняте рішення про доцільність адаптації до умов Тузлівських лиманів сучасної чисельної гідродинамічної моделі з інтегрованого пакета для моделювання Delft3D FM Suite 2D3D, розробки науково-дослідного інституту Deltares (м. Делфт, Нідерланди) [18]. У подальшому до основного гідротермодинамічного блоку пакету (D-Flow FM) можуть бути приєднані додаткові модулі для розрахунку транспорту наносів і деформацій дна (D-Morphology), моделювання якості вод (D-Water Quality) та ін.

Мета статті полягає у викладенні результатів адаптації сучасної чисельної гідродинамічної моделі Delft3D Flow Flexible Mesh до умов лиманів Тузлівської групи та застосування її для визначення ефективності різних варіантів забезпечення їх водообміну з морем на підставі результатів сценарного математичного моделювання. Зокрема, досліджуються варіанти функціонування відносно вузького з'єднувального каналу на 2-му км коси-пересипу (л. Бурнас) сумісно с прорвою, яка існувала до 2015 р.; широким контрольованим з'єднувальним каналом, замість прорви на 24-му км коси-пересипу (л. Шагани), додаткового (третього) вузького каналу на ділянці коси-пересипу, прилеглої до л. Алібей.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для оцінки впливу на гідроекологічний стан основних лиманів Тузлівської групи, за різних умов їх водообміну з морем через прорви (промоїни) та канали в косі-пересипу, використовувалась сучасна чисельна гідродинамічна модель Delft3D Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) [19], яка базується на чисельному розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливої рідини на мілкій воді у наближенні Буссінеска. Система диференціальних рівнянь моделі складається з рівнянь руху (у горизонтальній площині), рівняння нерозривності, рівняння перенесення (тепла та солей), а також двопараметричної $k-\epsilon$ -моделі турбулентності [20], яка замикає ці рівняння. Для рівняння

швидкості вертикального руху приймається гідростатичне наближення. Вертикальні компоненти векторів швидкості течії розраховуються через рівняння нерозривності. Рівняння стану морської води визначається за формулою ЮНЕСКО [21].

Модель D-Flow FM є подальшим розвитком гідротермодинамічного блоку Delft3D-FLOW інтегрованого пакета для моделювання Delft3D (версії 4.04.01) [18], яка при розрахунках використовує перевірені криволінійні розрахункові сітки у поєднанні із неструктурованими сітками. Це дозволяє більш точно описувати в моделі акваторію моря, що розглядається, включати до її складу різні за масштабом водні об'єкти складної (нерегулярної) просторової форми, збільшувати деталізацію результатів моделювання в необхідних областях при менших витратах комп'ютерного часу на проведення моделювання, у порівнянні з іншими гідродинамічними моделями реалізованими на неструктурованих сітках.

Для проведення модельних розрахунків, з метою адаптації моделі D-Flow FM до умов лиманів Тузлівської групи та її калібрування, була згенерована неструктурована розрахункова сітка, яка складалась з 7830 вузлів та 10412 розрахункових осередків (рис. 2б). Елементарні розрахункові осередки сітки мають змінні розміри в горизонтальній площині: від 18 м (в районах вузьких каналів, мілководних заток і проток) до 415 м. Сітка з високою точністю описує основні морфометричні особливості лиманів: конфігурацію берегової лінії, розташування місів, кіс, проток, каналів, розподіл глибин на акваторії лиманів.

У вертикальній площині в моделі задавались 10 розрахункових рівнів перемінної товщини, реалізовані в криволінійній σ -системі координат. Глибини в лиманах, приведені до позначки рівня мінус 0,4 м БС (рис. 2а), задавались на основі узагальнених даних промірів глибин, виконаних у різні роки фахівцями Одеського державного екологічного університету [5, 12] та Одеського національного університету ім. І.І. Мечнікова [15].

Моделювання виконувалось для гідрометеорологічних умов 2014 року, коли зв'язок лиманів

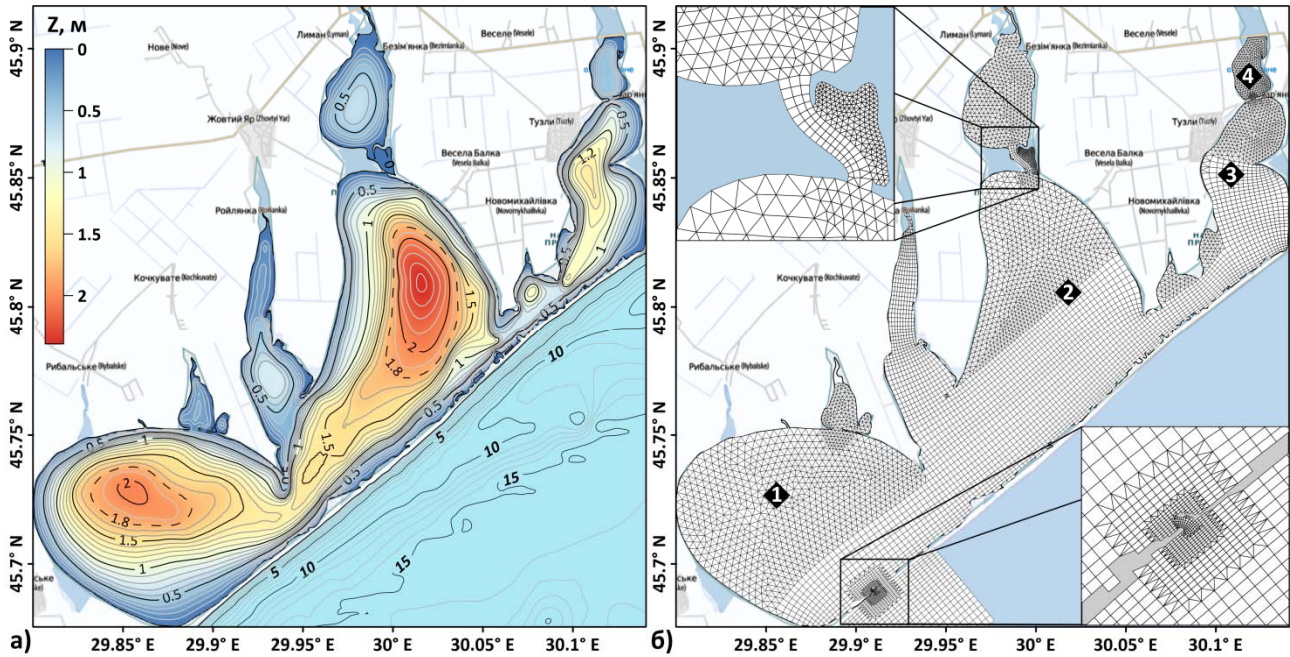


Рис. 2 – Батиметрія лиманів Тузлівської групи та прилеглої морської акваторії (а). Розрахункова сітка, побудована для адаптації та калібрування моделі (б). На вставках показані: канал між лиманом Алібей та оз. Хаджидер (вверху зліва); проран між лиманом Шагани та морем (внизу справа). Цифрами 1-4 позначені контрольні (реперні) точки для аналізу результатів моделювання

Fig. 2 – Bathymetry of the lagoons of Tuzla group and adjacent sea area (A). Computational mesh, created for model adaptation and calibration (B). Insets show the channel between the Alibey Lagoon and the Khadzhyder Lagoon (upper left) and the outlet to the sea from the Shahany Lagoon (lower right). Numbers 1-4 indicate control points for the analysis of model results

Тузлівської групи з морем здійснювався через розташовану на 24 км коси (л. Шагани) природну прорву шириною 150 м і глибиною 0,3-2,5 м (у поперечному розрізі) [12], утворену внаслідок розмиву спочатку невеликого, штучно створеного каналу. При розрахунках на верхній (з атмосферою) відкритій границі розрахункової області задавались: часова мінливість температури та відносної вологості повітря, кількості атмосферних опадів, відсоток хмарності – за даними спостережень на ГМС «Сарата» (рис. 3а-г).

Мінливість вітрових умов (рис. 3д, е) та синфазні з ними коливання рівня моря (із 6-годинною часовою дискретністю) на бічній відкритій морській межі розрахункової області задавалась за даними спостережень на прибережному гідрометеорологічному пості (МГП) «Царградське гирло» (рис. 4а). Мінливість температури та солоності морської води задавалась на всіх відкритих бічних границях моделі за даними МГП «Приморське-1». Використовувались середні декадні значення спостереженої на даному

посту температури води та значення 75% квантіля місячної мінливості солоності води, які були лінійно проінтерпольовані із 6-ти годинною дискретністю (рис. 4б, в).

Початкова позначка рівня води у лиманах приймалася рівною відмітці рівня моря. Початкове значення солоності води в лиманах приймалося рівним 21, 22 і 23 ‰ для лиманів Шагани, Алібей і Бурнас відповідно.

Оскільки стаціонарні регулярні спостереження за мінливістю характеристик гідрологічного режиму лиманів Тузлівської групи (коливаннями рівня води, температури, солоності, течіями), у їх зв'язку з внутрішньо-річною мінливістю метеорологічних умов, відсутні, то для калібрування та верифікації модельних розрахунків використовувались доступні результати епізодичних нерегулярних досліджень різних установ, включно з даними натурних експедиційних спостережень за температурою, солоністю води в лиманах, течією води у прорані, виконаних фахівцями ОДЕКУ, зокрема, у 2014 р. [12].

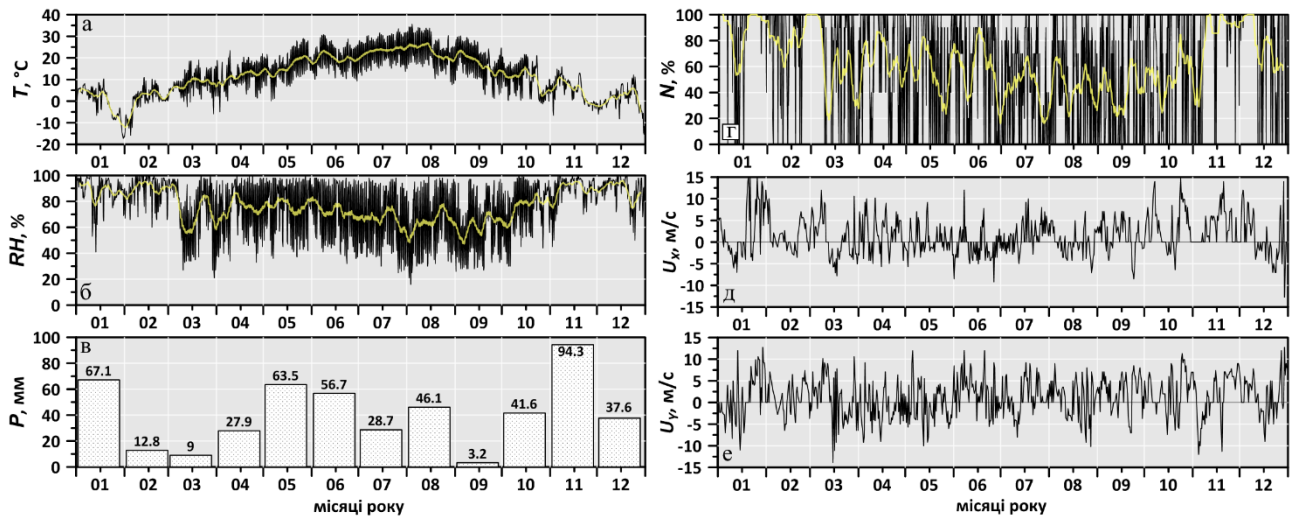


Рис. 3 – Мінливість температури, $^{\circ}\text{C}$, (а) та відносної вологості повітря, %, (б), місячних сум атмосферних опадів, мм, (в), відсотка хмарності, %, (г) у 2014 р. за даними ГМС «Сарата»; зональних (д) та меридіональних (е) компонент вектору швидкості вітру, м/с, за даними ГМП «Цареградське гирло»

Fig. 3 – Time series of air temperature, in $^{\circ}\text{C}$, (A), relative humidity of air, in per cent, (B), monthly sums of atmospheric precipitation, in mm, (C), cloudiness percentage, in per cent, (D) measured in 2014 at the “Sarata” meteostation; x- and y-components of wind vector, in m s^{-1} , (E and F respectively) at the “Tsaregradske Hyrlo” tide gage

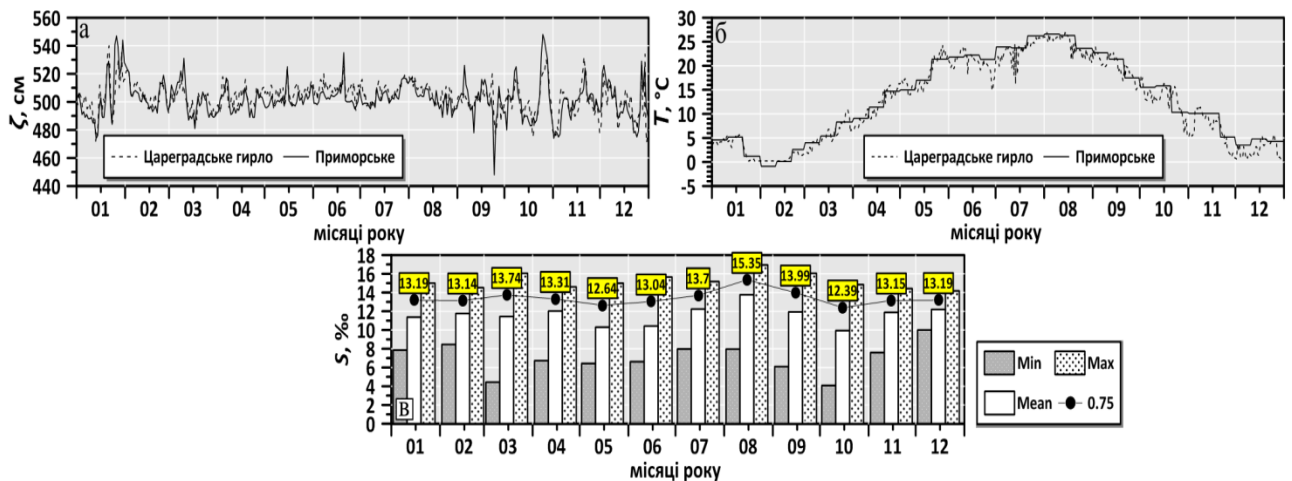


Рис. 4 – Коливання рівня моря, см, (а), мінливість температури морської води, $^{\circ}\text{C}$, (б) у 2014 р. за даними ГМП «Цареградське гирло» та «Приморське-1». Мінімальні, максимальні, середні та 75% (точки) значення солоності морської води, ‰, в різні місяці 2014 р. за даними ГМП «Приморське-1» (в)

Fig. 4 – Time series of water level, in cm, (A) and sea water temperature, in $^{\circ}\text{C}$, (B) measured in 2014 at the “Tsaregradske Hyrlo” (dashed line) and “Prymorske” (solid line) tide gages. Minimum, maximum, average (mean) and the upper quartile (dots) of sea water salinity, in ppt, measured at the “Prymorske” tide gage in 2014 (C)

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 5 наведені результати моделювання солоності вод в 4-х контрольних (реперних) точках на акваторії лиману (рис. 2б), які порівнювались з даними спостережень, виконаних у серпні 2014 р. Видно, що незважаючи на неточність завдання при моделюванні початкових значень солоності води в лиманах, мінливості гідрометеорологічних умов на границях розрахункової

області, отримана задовільна відповідність між спостереженими та розрахованими значеннями. Максимальна похибка знаходиться в межах 1 ‰ при діапазоні просторово-часової мінливості солоності в акваторії водойми протягом року 17–30 ‰. Деяке завищення модельованих значень солоності, порівняно зі спостереженими, може бути викликане неврахуванням при моделюванні надходження прісної води в лимани з їх водозбору зі стоком річок та водотоків.

Є дуже мало відомостей про особливості відгінно-нагінних коливаний рівня води в лиманах Тузлівської групи. В [1] зазначається, що за даними спостережень, виконаних наприкінці 50-х – початку 60-х років XX ст., найбільші перепади рівня води спостерігаються між протилежними кінцями водойми за вітрів, спрямованих вздовж її великої осі. Зокрема, за вітрів північного – східно-північно-східного напрямку швидкістю 6-16 м/с, рівень води в північно-східній частині водойми знижується на 0,25-0,45 м, а в південно-західній – збільшується на 0,3-0,5 м, тобто амплітуда відгінно-нагінних коливаний рівня води досягала 1,0 м. При такому поздовжньому ухлоні рівня відбувається оголення значних ділянок дна

навітряних районів водойми. Аналогічні результати отримані при моделюванні відгінно-нагінних коливаний рівня води в лиманах Тузлівської групи за умов 2014 р. (рис. 6-7).

Як зазначалось раніше, солоність вод «закритих» лиманів північно-західного Причорномор'я та характеристики її мінливості є основним індикатором стабільності гідро-екологічних умов в них, чинником, який визначає розвиток біотичних складових їх екосистем, біорізноманіття та біопродуктивності [13]. У свою чергу, характер просторово-часової мінливості солоності вод в лиманах досліджуваного типу визначається величиною дефіциту їхнього річного прісного балансу та умовами водообміну з морем через канали і прорани.

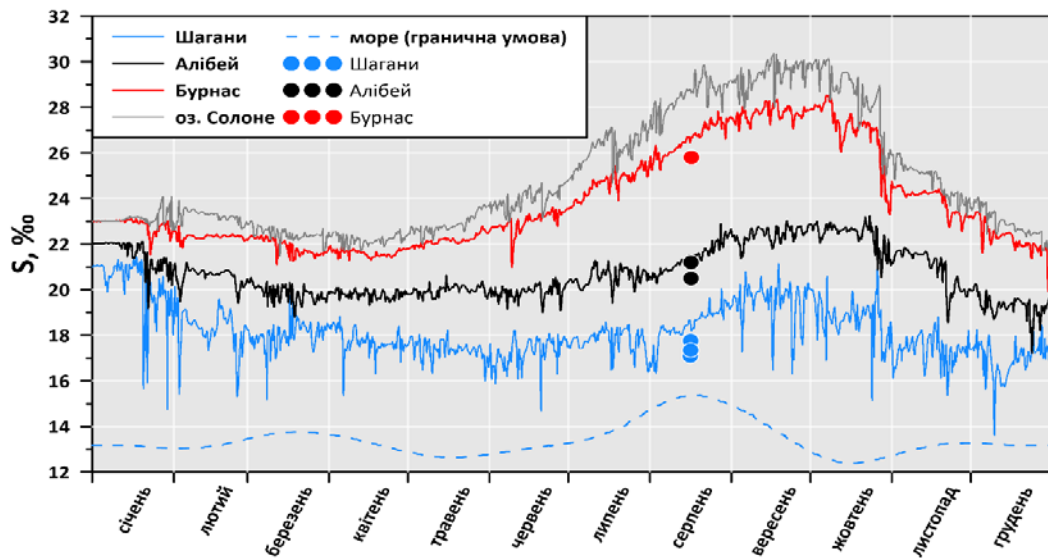


Рис. 5 – Солоність, ‰, поверхневого шару вод за результатами моделювання для 2014 року в різних контрольних точках акваторії лиману (криві) та згідно даних натурних спостережень 14-17.08.2014 р. (точки)

Fig. 5 – Measured (dots) and modelled (solid lines) water salinity, in ppt, in the upper layer of the lagoons in 2014 for different control points



Рис. 6 – Коливання рівня води, м БС, в лиманах Шагани та Бурнас у 2014 р. за результатами моделювання. Стрілки показують моменти часу значних відгінно-нагінних відхилень рівня води в лиманах, для яких побудовані поля просторової мінливості рівня

Fig. 6 – Time series of modelled water level, in m BS, in the Shahany and Burnas lagoons in 2014. Arrows indicate time points, corresponding to significant wind-induced set-down phenomena in the lagoons, for which the maps of spatial variability of water level are created

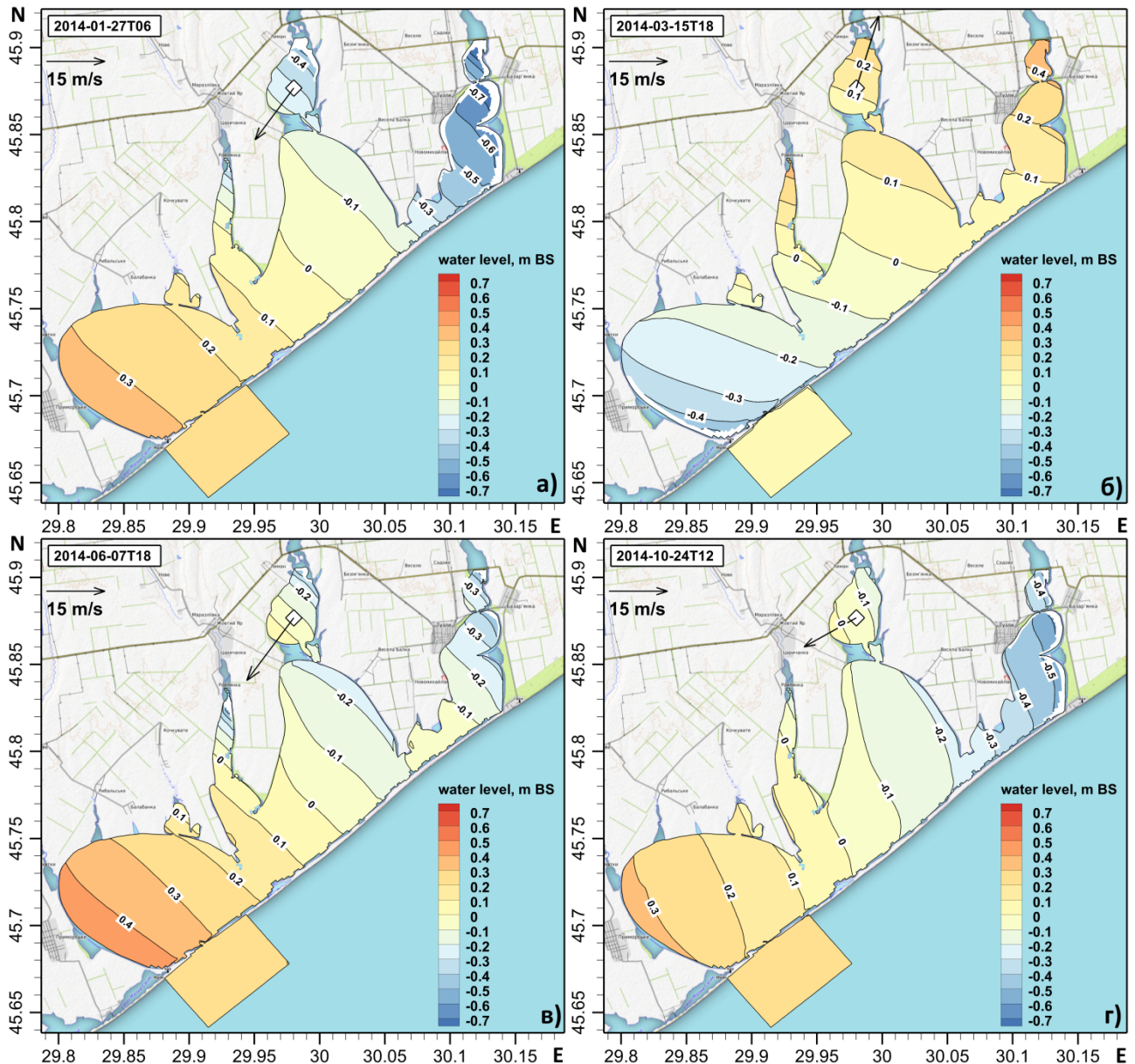


Рис. 7 – Рівень води, м БС, в Тузлівських лиманах в моменти часу: а) 27.01.2014 р. 06:00; б) 15.03.2014 р. 18:00; в) 07.06.2014 р. 18:00; г) 24.10.2014 р. 12:00. Стрілка на карті показує напрям та швидкість вітру. Білим кольором позначені ділянки осушення акваторії лиманів внаслідок відгінних явищ

Fig. 7 – Spatial variability of water level, in m BS, in the Tuzla group of lagoons at the following time points: 06:00 AM 27.01.2014 (A); 06:00 PM 15.03.2014 (B); 06:00 PM 07.06.2014 (C); 12:00 PM 24.10.2014 (D). The arrows on maps show wind direction and wind speed magnitude. Areas of drying of the lagoons water area due to set-down are marked with white

Вплив різних варіантів водообміну лиманів Тузлівської групи з морем, через штучно створені в косі канали, на просторово-часову мінливість солоності їхніх вод визначався на основі результатів сценарного чисельного моделювання. Додатково до описаного вище базового «0» варіанту, який відповідав умовам 2014 р., розглядались такі варіанти забезпечення водообміну лиманів з морем (рис. 8):

1) *Варіант 1.* Додано один штучно створений канал в північній частині коси-пересипу,

прилеглий до л. Бурнас. Цей канал, шириною 15 м, функціонує безперервно протягом року. Параметри прорви в косі, прилеглої до л. Шагани (*варіант «0»*), залишаються незмінними.

2) *Варіант 2.* Два канали у косі-пересипу, що відокремлює Тузлівські лимани від моря: шириною 60 м – на ділянці прилеглий до л. Шагани (замість прорану), та шириною 15 м – на ділянці, прилеглий до л. Бурнас. Канали функціонують безперервно протягом року.

Варіант 3. Три канали у косі-пересипу: шириною 60 м – на ділянці, прилеглій до л. Шагани, та шириною по 15 м – на ділянках, прилеглих до лиманів Алібей і Бурнас. Канали функціонують безперервно протягом року.

Схема розташування каналів в косі-пересипу Тузлівських лиманів та розрахункові сітки в них наведені на рис. 8.

Моделювання усіх варіантів здійснювалось за гідрометеорологічних умов 2014 р., описаних раніше.

Мета реалізації *варіанту 1* полягала у зниженні просторових градієнтів солоності води в акваторії групи лиманів шляхом зниження солоності води в лимані Бурнас-оз. Солоне, де вона у «0» варіанті в вересні-жовтні досягала значень 28-30 ‰ (рис. 5).

У *варіанті 2* створюється штучний канал шириною 60 м з відміткою дна мінус 1,0 м БС,

замість неконтрольованого широкого та глибокого прорану на ділянці коси-пересипу, прилеглої до л. Шагани. Доцільність моделювання цього варіанту визначається тим, що, за свідченням [22], функціонування неконтрольованих прорв призводить до інтенсивного надходження в лимани величезних обсягів піску та мулу, які забирає море з морського боку коси, прагнучі закрити таку проміну. В результаті, в лиманах відбувається замулення значних акваторій, включно з нерестовищами аборигенних видів риб, утворюються коси, мілководдя та острови, погіршується стан природної кормової бази, виникає загроза поступового руйнування морської коси-пересипу [22]. Тому підтримання постійного водообміну лиманів з морем через контрольовані і облаштовані, відповідно до встановлених вимог, штучні канали має свої переваги.

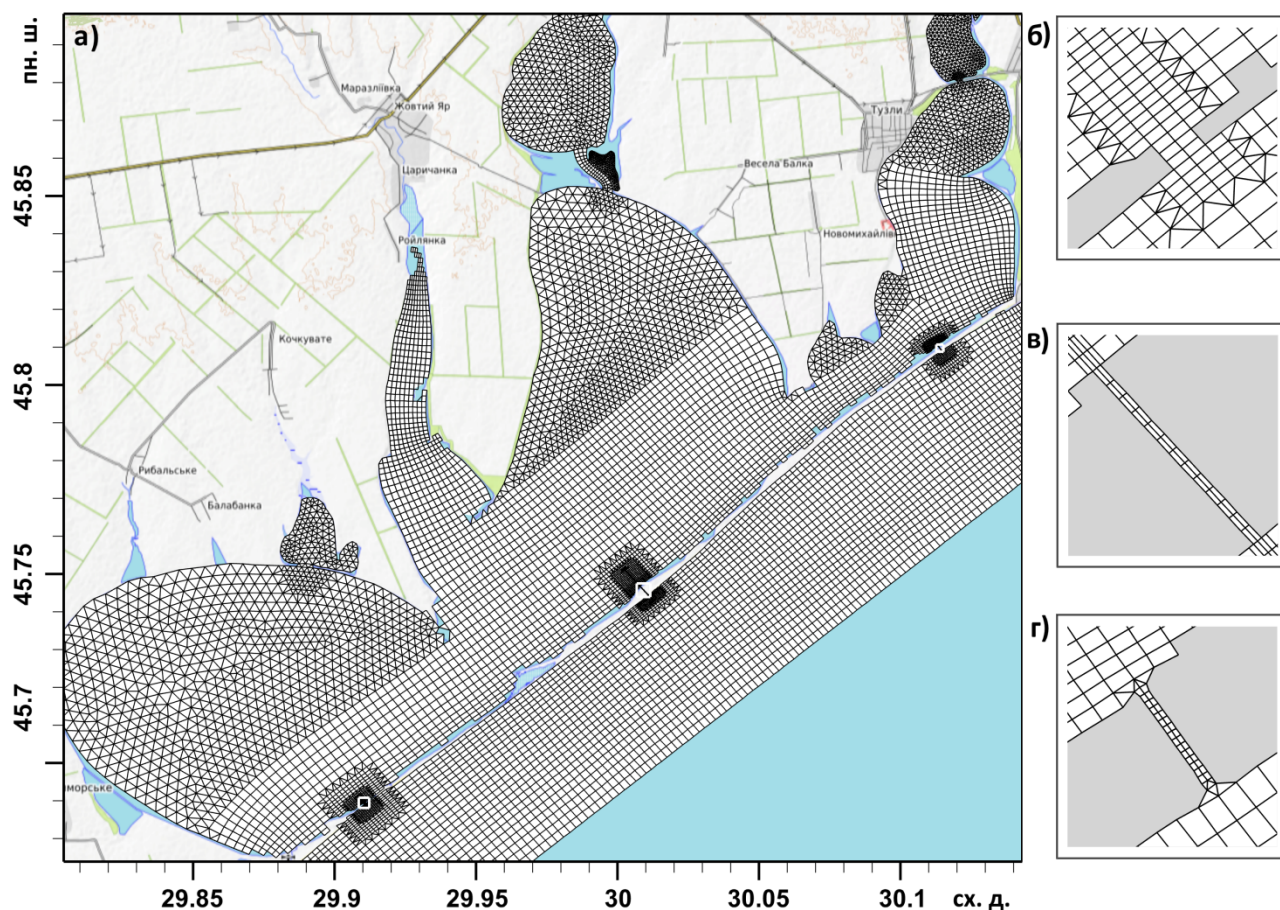


Рис. 8 – Розрахункова сітка для акваторії Тузлівської групи лиманів у варіанті з трьома з'єднувальними каналами (а); вбудовані розрахункові сітки в каналах: б – л. Шагани; в – л. Алібей; г – л. Бурнас

Fig. 8 – Computational mesh for the water area of the Tuzla group of lagoons in the variant with three connecting channels (A). Fragments of computational mesh in the channels near the Shahany Lagoon (B); the Alibey Lagoon (C); the Burnas Lagoon (D)

Доцільність моделювання *варіанту 3* визначається тим, що періодично виникає питання про можливість і доцільність створення не двох, а трьох і більше каналів у косі-пересипу для забезпечення стабілізації гідроекологічних умов в лиманах та підвищення їхньої рибопродуктивності. Однак, ще в [1] зазначалось, що необґрунтоване створення та функціонування необлаштованих обловно-запускних каналів в різних районах коси-пересипу збільшує загрозу розмиву окремих її ділянок, утворення широких неконтрольованих промоїн, порушує умови істотного водообміну і, як наслідок, інтенсивність рибоходу восени та навесні. На рис. 9-10 показані результати моделювання річного циклу солоності води в лиманах при вищезазначених варіантах водообміну. З рис. 9 видно, що на кінець року моделювання солоність вод в контрольних точках лиманів Шагани, Алібей, Бурнас (17, 19 і 22 ‰ у варіанті «0») зміниться: до 17-18 ‰ – у варіанті 1; до 21 ‰ в лиманах Шагани, Бурнас і 22 ‰ в л.Алібей – у варіанті 2; до 19 ‰ в лиманах Шагани, Бурнас і 20 ‰ в л.Алібей – у варіанті 3. Із порівняння цих значень з початковими (21, 22 і 23‰ для лиманів Шагани, Алібей і Бурнас, відповідно) можна зробити висновок, що у всіх розглянутих варіантах відбувається стабілізація гідроекологічних умов в лиманах, оскільки значення солоності на кінець року менші або дорівнюють (у варіанті 2 л. Алібей) початковим.

В цілому, результати, наведені на рис. 9-10, свідчать, що наявність двох штучних з'єднувальних каналів в косі-пересипу, що відокремлює Тузлівські лимани від моря, шириною 60 м в л.Шагани і 15 м в л. Бурнас, які функціонують цілорічно, є достатньою умовою для стабілізації в них гідроекологічних умов. І це незважаючи на те, що витрати води через штучний канал в л. Шагани значно зменшаться, порівняно з витратами води через промоїну, яка діяла до 2015 р. (рис. 11). В той же час, додаткове створення третього каналу в косі-пересипу на ділянці, прилеглій до л. Алібей, у варіанті 3, не дає значущого ефекту порівняно з варіантом 2, окрім зменшення максимальних значень солоності у вересні-жовтні в л. Алібей з 24 до 22 ‰, що не є принциповим.

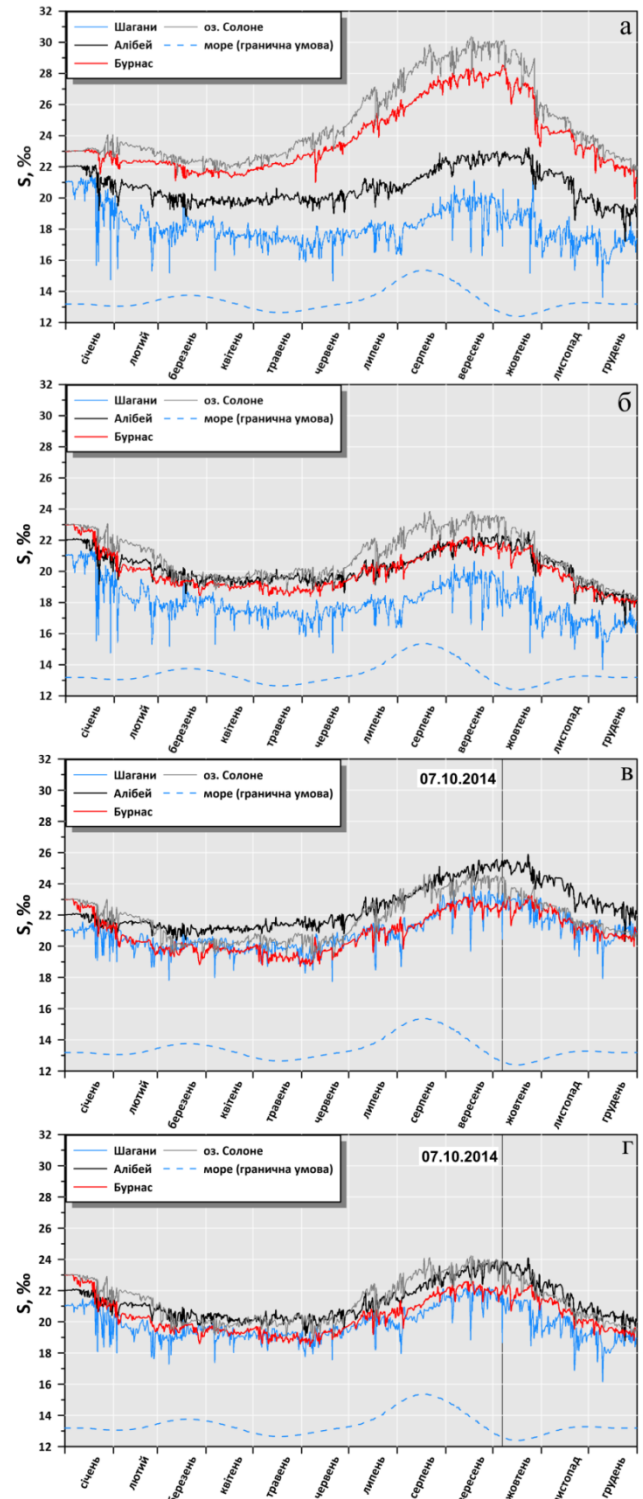


Рис. 9 – Мінливості солоності, ‰, поверхневого шару вод в контрольних точках на акваторії Тузлівських лиманів за різних варіантів водообміну з морем: а – Варіант 0; б – Варіант 1; в – Варіант 2; г – Варіант 3

Fig. 9 – Time series of modelled water salinity, in ppt, of the sub-surface water layer in the control points at the Tuzla lagoons water area under various variants of water exchange with the sea: Variant 0 (A); Variant 1 (B); Variant 2 (C); Variant 3 (D)

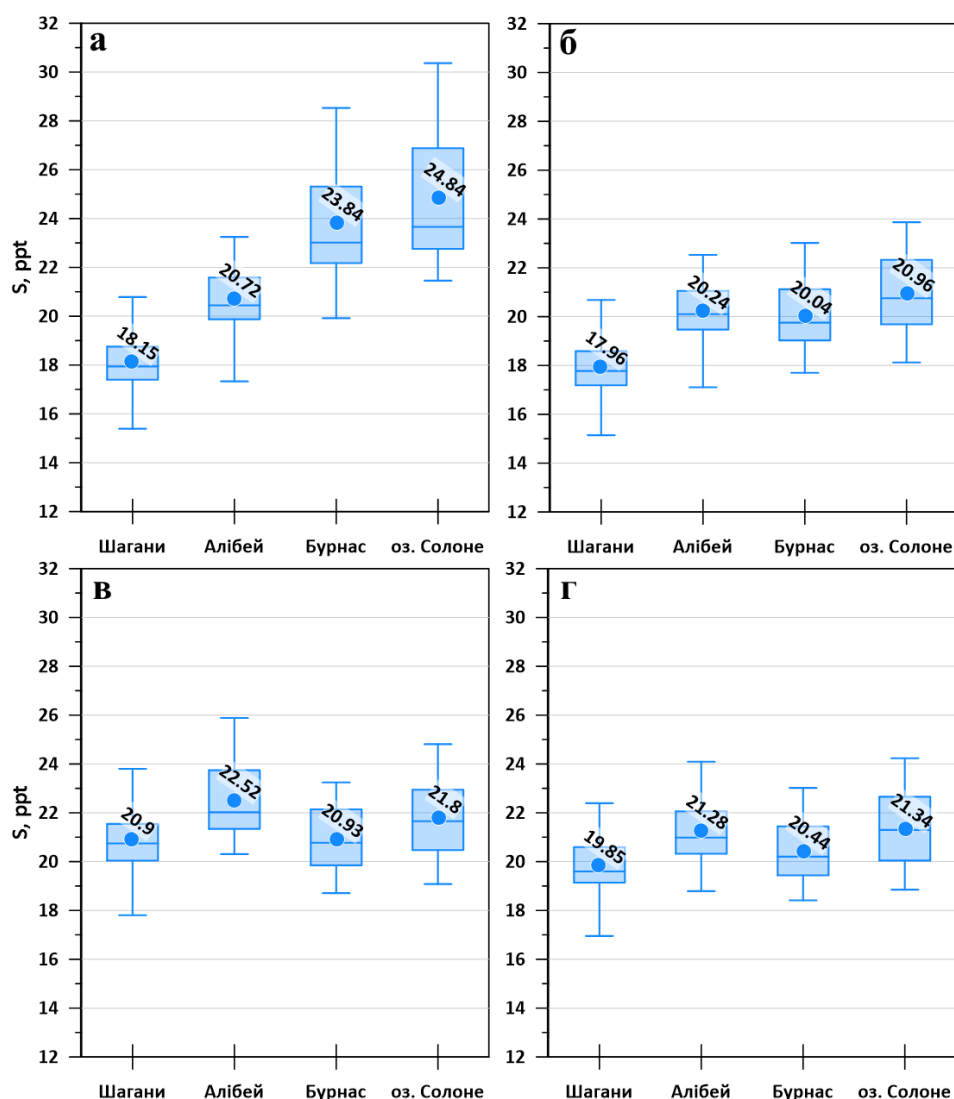


Рис. 10 – Характеристики просторово-часової мінливості солоності, ‰, у поверхневому шарі вод, в контрольних точках акваторії Тузловських лиманів, за різних варіантів водообміну з морем: а – Варіант 0; б – Варіант 1; в – Варіант 2; г – Варіант 3. Представлені мінімальні, максимальні, медіані, середні (точки) значення, а також значення 0,25- та 0,75-квартілей

Fig. 10 – Description of spatio-temporal variability of water salinity, in ppt, in the sub-surface layer of water area of the Tuzla group of lagoons (in control points) under different variants of water exchange with the sea: Variant 0 (A), Variant 1 (B), Variant 2 (C), Variant 3 (D). Minimum, maximum, median, average (dots) values are shown, as well as the lower and the upper quartiles

На рис. 12 наведені приклади циркуляції вод в лиманах Тузлівської групи при реальних вітрових ситуаціях 15.03.2014 та 24-25.10.2014 р., за яких мали місце значні відгінно-нагінні відхилення рівня води в лиманах від незбуреного вітром стану (рис. 7б, г), та течій в каналах для варіанту 2. Видно, що у разі функціонування двох з'єднувальних каналів на ділянках косипересипу, прилеглих до лиманів Шагани і Алібей, в них виникають різноспрямовані потоки води при поздовжніх відносно великої осі

водойми вітрах. В періоди виникнення значних відгінно-нагінних коливань рівня води, в лиманах Тузлівської групи забезпечується інтенсивна промивка водойми морськими водами з солоністю нижчою ніж в лиманах, що запобігає накопиченню в них солей.

Різницю у просторовому розподілі солоності вод в акваторії лиманів у варіантах 2 та 3 ілюструють результати моделювання, наведені на рис. 13.

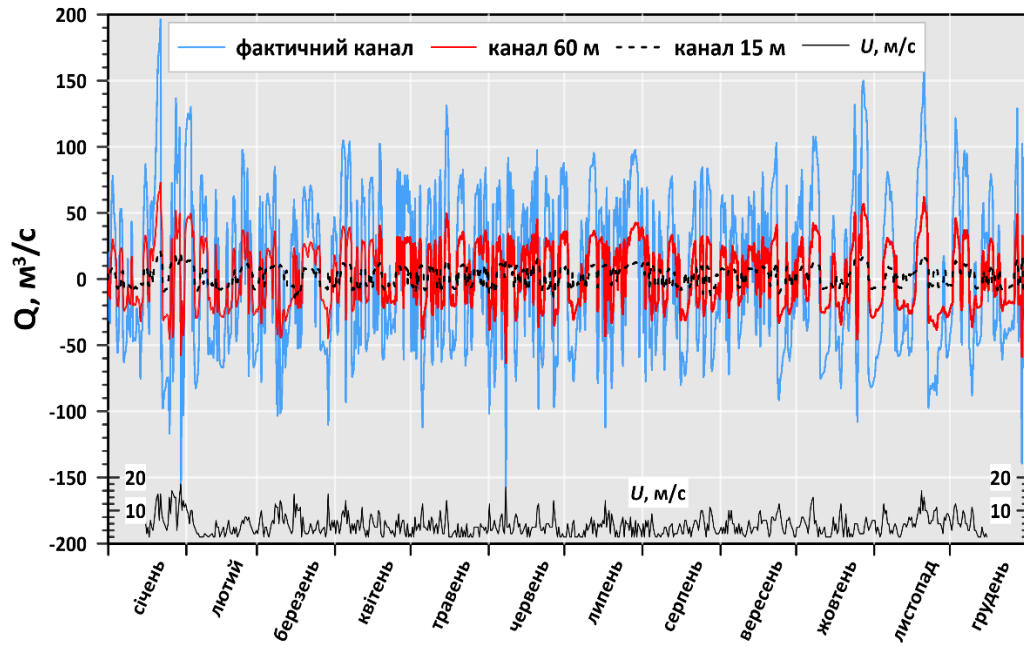


Рис. 11 – Мінливість витрат води, $\text{м}^3/\text{с}$, в каналах, які з'єднують Тузлівські лимани з морем, та модуля швидкості вітру, $\text{м}/\text{с}$, протягом року

Fig. 11 – Time series of modelled water discharge, in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, in the channels, and wind speed magnitude, in m s^{-1} , during the year

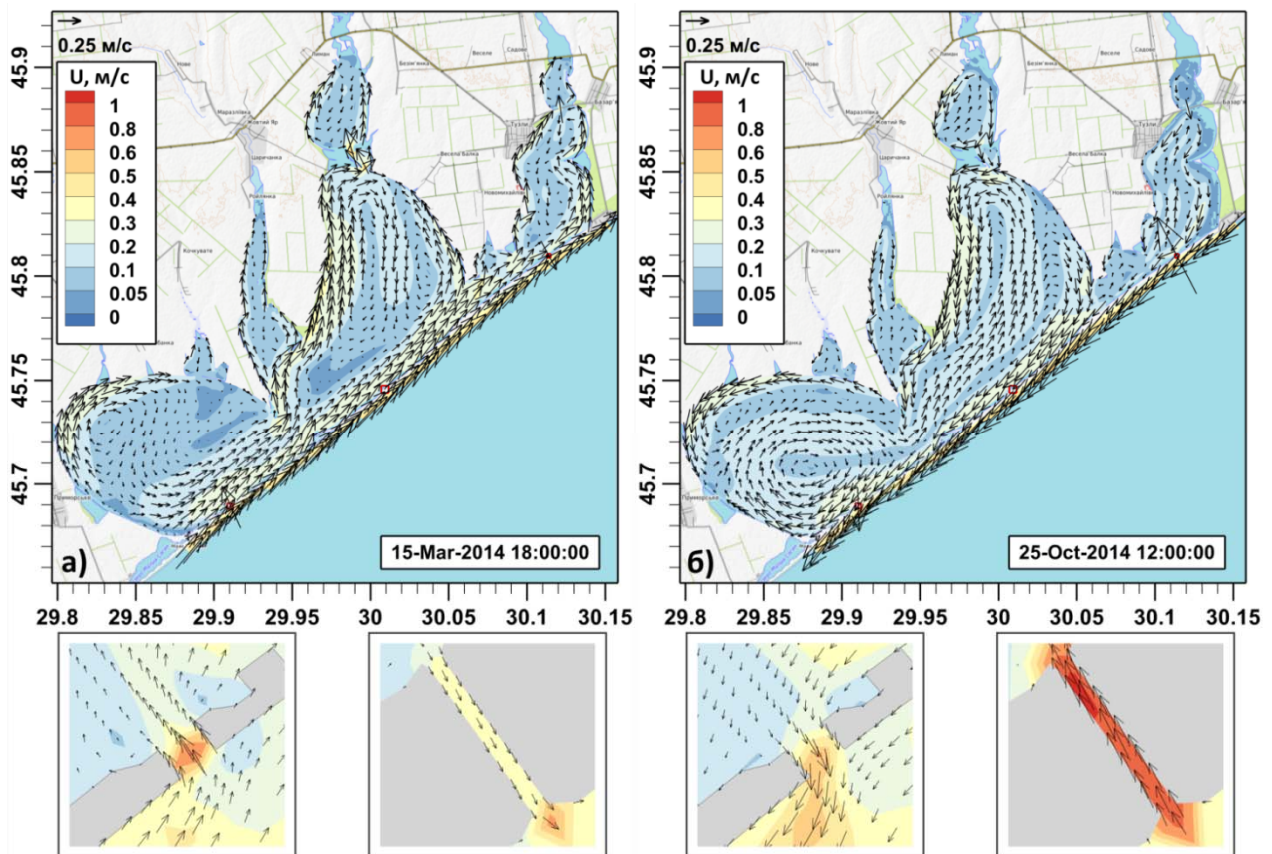


Рис. 12 – Просторовий розподіл осереднених за глибиною течій, $\text{м}/\text{с}$, в акваторії Тузлівських лиманів (зверху) та в з'єднувальних каналах (знизу) (варіант 2): а) 15.03.2014 18:00; б) 25.10.2014 12:00

Fig. 12 – Spatial distribution of depth-averaged flow velocity, in m s^{-1} , in the water area of the Tuzla group of lagoons (upper) and in channels (lower) at time-points 06:00 PM 15.03.2014 (A) and 12:00 PM 25.10.2014 (B) under variant 2 of functioning of interconnecting channels

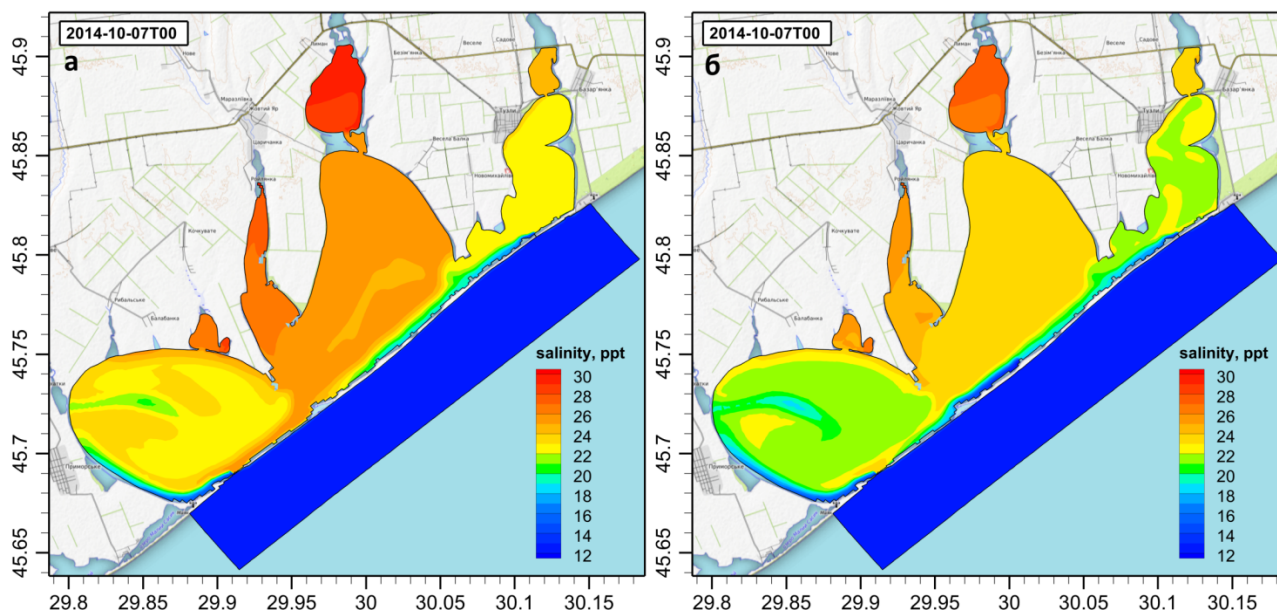


Рис. 13 – Просторовий розподіл солоності поверхневого шару вод, ‰, в акваторії Тузлівської групи лиманів в момент часу 07.10.2014 р. 00:00, у варіантах 2 (а) і 3 (б) функціонування з'єднувальних каналів

Fig. 13 – Spatial distribution of salinity, in ppt, in the sub-surface layer of water area of the Tuzla group of lagoons at time-point 12:00 AM 07.10.2014 under variants 2 (A) and 3 (B) of functioning of interconnecting channels

Для визначення часу водооновлення лиманів Тузлівської групи та їхніх ділянок морськими водами, які надходять до них через з'єднувальні канали, моделювалось проникнення у водойму домішки нейтральної плавучості, концентрація якої в морській воді приймалася рівною одній умовній одиниці, а в лиманах в початковий момент часу – нулю. У такій постановці, динаміка концентрації умовної домішки в кожній точці розрахункової області лиману відповідає динаміці об'ємної концентрації морської води, представленої у частках одиниці. Досягнення верхньої межі в 1,0 ум. од. відповідає повному водооновненню в розрахунковій точці в результаті надходження морських вод.

Результати розрахунків динаміки об'ємної концентрації морської води в реперних точках основних лиманів Тузлівської групи, у разі реалізації варіантів 2 і 3, показані на рис. 14. Вони свідчать, що час повного водооновлення лиману Шагани складе близько 8 місяців, а лиманів Алібей і Бурнас – 10 місяців у варіанті 3, і 12 місяців – у варіанті 2.

4. ВИСНОВКИ

Результати моделювання динаміки вод, відгінно-нагінних коливань рівня води, річного циклу мінливості солоності води в лиманах Туз-

лівської групи, отримані із використанням сучасної чисельної гідродинамічної моделі Delft3D Flow Flexible Mesh за гідрометеорологічних умов 2014 р. свідчать, що оптимальне вирішення проблеми стабілізації гідроекологічного режиму водойми полягає в забезпеченні постійного протягом року різноспрямованого водообміну з морем через два штучних з'єднувальних канали в косі-пересипу з відмітками дна мінус 1,0 м БС, шириною 60 м – для л. Шагани та 15 м – для л. Бурнас. В цьому разі не буде відбуватись засолення водойми у багаторічній перспективі. Час повного водооновлення морською водою лиману Шагани становить близько 8 місяців, а лиманів Алібей і Бурнас – 12 місяців.

В результаті розрахунків встановлено, що створення додаткового, третього каналу на ділянці коси-пересипу прилеглий до л. Алібей не дає значущого ефекту порівняно з варіантом функціонування двох каналів, окрім зменшення максимальних значень солоності у вересні-жовтні в л. Алібей з 24 до 22 ‰, що не є принциповим.

У подальшому гідротермодинамічний блок D-Flow FM пакету моделей Delft3D може бути доповнений модулями для розрахунку транспорту наносів і деформацій дна (D-Morphology), моделювання якості вод (D-Water Quality) і

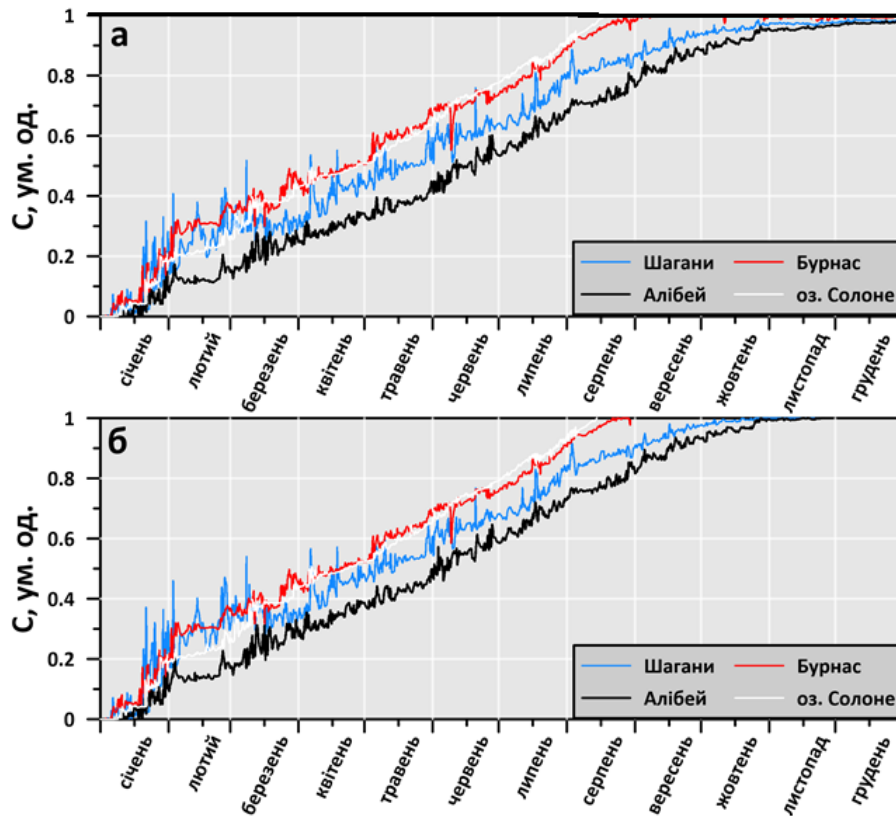


Рис. 14 – Зміни концентрації консервативної домішки, в умовних одиницях (об'ємної концентрації морської води в частках від одиничного об'єму лиманних вод), яка надходить до лиманів з морськими водами у варіантах 2 (а) і 3 (б)

Fig. 14 – Changes in concentration of conservative substance, in arbitrary units (volume concentration of sea water in parts of unit volume of lagoon waters), which comes to the lagoons with sea water under variants 2 (A) and 3 (B)

використаний для оцінки інтенсивності занесення/розмиву з'єднувальних каналів, ерозії/абразії дна на різних ділянках акваторії лиманів, біопродуктивності та якості вод їхніх вод за різних варіантів водного та екологічного менеджменту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розенгургт М. Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов одесских лиманов: монография. Киев : Наукова думка, 1974. 217 с.
2. Старушенко Л. И., Бушуев С. Г. Причерноморские лиманы Одесщины и их рыбохозяйственное использование: монография / Оф ИнБЮМ. Одесса: Астропринт, 2001. С.32-43.
3. Лиманно-устьевые комплексы Причерноморья: географические основы хозяйственного освоения / под ред. Г.И. Швевса. Ленинград: Наука, 1988. 303 с.
4. Шекк П.В. Ихтиофауна водоемов Национального природного парка "Тузловские лиманы" и ее рыбохозяйственное использование. *Рибогосподарська наука України*. 2015. 2. С. 5-19.
5. Розробка заходів щодо відновлення і підтримання сприятливих гідрологічного і гідрохімічного режимів в районі Тузлівської групи лиманів : звіт про НДР заключний. ДР № 0103U006209 / наук. кер. Є. Д. Гопченко; база даних УкрНТЕІ; бібл. Од. держ. еколог. ун-ту. 2003. 158 с.
6. Моделювання гідрологічного і гідрохімічного режимів Тузлівської групи лиманів, спрямованих на покращення їх екологічного стану. : звіт про НДР заключний. ДР № 0104U010367 / наук. кер. Є. Д. Гопченко; база даних УкрНТЕІ; бібл. Од. держ. еколог. ун-ту. 2004. 88 с.
7. Гопченко Е. Д., Тучковенко Ю. С. Сценарное моделирование водно-солевого режима Тузловских лиманов. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2003. Вып.10. С. 243 - 255.
8. Стабилизация гидрологического и гидрохимического режимов Тузловских лиманов путем регулирования водообмена с морем / Гопченко Е.Д., и др. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2005. Вип.1. С. 187 - 194.
9. Управление качеством вод Причерноморских лиманов и Придунайских озер путем регулирования водного баланса / Иванов В. А. и др. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное*

- использование ресурсов шельфа. 2006. Вып. 14. С. 93 - 106.
10. Иванов В. А., Тучковенко Ю. С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем: монография / Морской гидроф. ин-т НАН Украины; Одес. гос. экол. ун-т. Севастополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 368 с.
11. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья : монография / под ред. Ю.С. Тучковенко, Е.Д. Гопченко; Одесский государственный экологический университет. Одесса : ТЕС, 2012. 224 с.
12. Стабилизация гидроэкологического режима Тузовской группы лиманов путем регулирования водообмена с морем (науч. рук. Ю. С. Тучковенко). Отчет про научно-исследовательскую работу / Одесский государственный экологический университет. 2014. 70 с.
13. Шекк П. В. Екологічні чинники формування природної продуктивності водойм північно-західного Причорномор'я. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*. 2015. 1 (8). С. 45-53.
14. Попова О. М. Просторова динаміка солоності акваторій Національного природного парку «Тузлівські лимани» за екстремальних умов 2020 року. *Академіку Л.С. Бергу – 145 лет: сборник научных статей*. ISBN 978-9975-3404-9-6. Бендеры: Есо-TIRAS, 2021. С.437-440.
15. Шуйский Ю. Д., Выхованец Г. В. Природа Причерноморских лиманов : монография. Одесса: Астропринт, 2011. 276 с.
16. Тучковенко Ю. С., Хохлов В. М., Лобода Н. С. Оцінка впливу зміни клімату на складові прісного водного балансу лиманів північно-західного Причорномор'я. *Другий Всеукраїнський гідрометеорологічний з'їзд: тези доповідей*, 7-9 жовтня. Одеса, ISBN 978-966-186-163-2, 2021. С. 209-211.
17. Тучковенко Ю. С., Лобода Н. С. Влияние изменений климата на стратегию водного менеджмента лагун северо-западного Причерноморья. *Перший Всеукр. гідрометеорологічний з'їзд з міжнародною участю : тези доповідей* (Одеса, 22-23 березня 2017 р.). Одеса: ТЕС, 2017. С. 312 - 313.
18. Deltares. (2021). 3D/2D modelling suite for integral water solutions Delft3D. Functional Descriptions. Deltares systems, version: 2.20, SVN revision: 52614. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-Functional_Specifications.pdf (дата звернення: 03.12.2021).
19. Deltares. (2021). D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 2022.02, SVN revision: 73609. Delft, the Netherlands URL: http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (дата звернення: 05.11.2021).
20. Burchard H., Baumert H. On the performance of a mixed layer model based on the k-ε turbulence closure. *Journal of Geophysical Research*. 1995. 100. Pp. 8523-8540.
21. Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater / Millero Frank J. et al. *Unesco technical papers in marine science*, 1981. 38. 192p.
22. Шекк П. Тузовские лиманы, каналы, прорвы и кефалевый промысел. *Вечерняя Одесса*, №134-135 (10981-10982), 10 декабря 2020 г. URL: <http://vo.od.ua/rubrics/ehkoklub/45582.php> (дата звернення 04.12.2021 р.)

REFERENCES

1. Rozengurt, M. Sh. (1974). *Gidrologiya i perspektivy rekonstruktsii prirodnikh resursov odesskikh limanov* [Hydrology and prospects for the reconstruction of the natural resources of the Odessa limans]. Kyiv: Naukova dumka. (in Russ.)
2. Starushenko, L. I. & Bushuev, S. G. (2001). *Prichernomorskie limany Odeshchiny i ikh rybokhozyaystvennoe ispol'zovanie* [Black Sea region limans of Odeshchina and their fishery use]. Odessa Branch of Institute of Biology of Southern Seas. Odesa: Astroprint. (in Russ.)
3. Shvebs, G. I. (ed.). (1988). *Limanno-ust'evye komplekсы Prichernomor'ya: geograficheskie osnovy khozyaystvennogo osvoeniya* [Liman-estuarine complexes of the Black Sea region: geographical bases of economic development]. Leningrad: Nauka. (in Russ.)
4. Shekk, P. V. (2015). Ikhtiofauna vodoemov Natsional'nogo prirodnogo parka "Tuzlivskie limany" i ee rybokhozyaystvennoe ispol'zovanie [Ichthyofauna of water bodies of the National Natural Park "Tuzlovskiy Limany" and its fishery use]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy* [Fisheries science of Ukraine], 2, pp. 5-19. (in Russ.)
5. Hopchenko, E. D. (scient. chief) (2003). *Development of measures to restore and maintain favorable hydrological and hydrochemical regimes in the Tuzla group of lagoons. Final Report*. State Registration No. 0103U006209. UkrSTEI database, Library of Odessa State Environmental University. (in Ukr.)
6. Hopchenko, E. D. (scient. chief) (2004). *Modelling of hydrological and hydrochemical regimes of the Tuzla group of lagoons aimed at improving their ecological condition. Final Report*. State Registration No. 0104U010367. UkrSTEI database, Library of Odessa State Environmental University. (in Ukr.)
7. Hopchenko, E. D. & Tuchkovenko, Yu. S. (2003). Stenarnoe modelirovanie vodno-solevogo rezhima Tuzlovskikh limanov [Scenario modeling of the water-salt regime of the Tuzlovsky lagoons]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources], 10, pp. 243-255. (in Russ.)
8. Hopchenko, E. D., Tuchkovenko, Yu. S., Serbov, N. G. et al. (2005). Stabilizatsiya gidrologicheskogo i gidrokhimicheskogo rezhimov Tuzlivskikh limanov putem regulirovaniya vodoobmena s morem [Stabilization of hydrological and hydrochemical regimes of Tuzla lagoons by regulating water exchange with the sea]. *Visnik Odes'kogo derzhavnogo ekolohichnogo universitetu* [Bulletin of Odessa state environmental university], 1, pp. 187-194.

- (in Russ.)
9. Ivanov, V. A., Hopchenko, E. D., Tuchkovenko, Yu. S. et al. (2006). Upravlenie kachestvom vod Prichernomorskiikh limanov i Pridunayskiikh ozer putem regulirovaniya vodnogo balansa. [Water quality management of the Black Sea lagoons and Danube lakes by regulating the water balance]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources], 14, pp. 93-106. (in Russ.)
 10. Ivanov, V. A., & Tuchkovenko, Yu. S. (2006). *Prikladnoe matematicheskoe modelirovanie kachestva vod shel'fovyykh morskikh ekosistem* [Applied mathematical water-quality modeling of shelf marine ecosystems]. Marine Hydrophysical Institute of NASU, Odessa State Environmental University. Sevastopol: SPC EKOSI-Gidrofizika Publ. (in Russ.)
 11. Tuchkovenko, Yu. S., Hopchenko, E. D. (eds). (2012). *Aktual'nye problemy limanov severo-zapadnogo Prichernomor'ya* [Actual problems of lagoons of the northwestern Black Sea region]. Odessa State Environmental University. Odessa: TES Publ. (in Ukr.)
 12. Tuchkovenko, Yu. S. (scient. chief) (2014). *Stabilization of the hydroecological regime of the Tuzlovskaya group of lagoons by regulating water exchange with the sea. Scient. Report.* Odessa State Environmental University. 70 p. (in Ukr.)
 13. Shekk, P. V. (2015). Ekologichni chynnyky formuvannya pryrodnoi produktyvnosti vodoim pivnichno-zakhidnoho Prychornomor'ya [Ecological factors of formation of natural productivity of reservoirs of the north-western Black Sea coast]. *Ekologichni nauky* [Ecological Sciences], 1 (8), pp. 45-53. (in Ukr.)
 14. Popova, O. M. (2021). [Spatial dynamics of salinity of the waters of the National Natural Park "Tuzla Limans" under extreme conditions in 2020]. *Akademiku L.S. Bergu – 145 let: sbornik nauchnykh statey* [Academician L.S. Berg is 145 years old: a collection of scientific articles]. Bendery, pp. 437-440. (in Ukr.)
 15. Shuyskiy, Yu. D. & Vykhovanets, G. V. (2011). *Priroda Prichernomorskiikh limanov* [The nature of the Black Sea limans]. Odessa: Astroprint. (in Russ.)
 16. Tuchkovenko, Yu. S., Khokhlov, V. M. & Loboda, N. S. (2021) [Assessment of the impact of climate change on the components of the fresh water balance of the lagoons of the north-western Black Sea coast]. *Tezy dopovidei 2th Vseukrainskoho hidrometeorologichnoho zizdu* [Theses of reports of the Second All-Ukrainian Hydrometeorological Congress], 7-9 October. Odessa, pp. 209-211. (in Ukr.)
 17. Tuchkovenko, Yu.S. & Loboda, N.S. (2017). [Impact of the climate change on the strategy of water management of lagoons of the Northwestern Black Sea]. *Tezy dopovidei 1th Vseukrainskoho hidrometeorologichnoho zizdu z mizhnarodnoiu uchastiu* [Theses of reports of the First All-Ukrainian Hydrometeorological Congress with International Participation], 22-23 March. Odessa, pp. 312–313. (in Ukr.)
 18. Deltares. (2021). 3D/2D modelling suite for integral water solutions Delft3D. Functional Descriptions. Deltares systems, version: 2.20, SVN revision: 52614. Available at: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-Functional_Specifications.pdf (Accessed: 03.12.2021).
 19. Deltares. (2021). D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 2022.02, SVN revision: 73609. Delft, the Netherlands Available at: http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (Accessed: 05.11.2021).
 20. Burchard, H. & Baumert, H. (1995) On the performance of a mixed layer model based on the k-ε turbulence closure. *Journal of Geophysical Research*, 100, pp. 8523-8540.
 21. Millero, Frank, J et al. (1981). Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater. *Unesco technical papers in marine science*.
 22. Shekk, P. V. (10.12.2020) Tuzlovskie limany, kanaly, prorvy i kefalevyy promysel [Tuzla lagoons, canals, outlets and mullet fishing]. *Vechernyaya Odessa* [Evening Odessa], 134-135 (10981-10982). Available at: <http://vo.od.ua/rubrics/ehkoklub/45582.php> (Accessed: 04.12.2021) (in Russ.)

MODELING OF VARIABILITY OF HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE TUZLA GROUP OF LAGOONS UNDER VARIOUS VARIANTS OF THEIR WATER EXCHANGE WITH THE SEA

Yu. S. Tuchkovenko, D. V. Kushnir

Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, tuch2001@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

The article is devoted to solving the problem of stabilization of hydrological regime and hydro-ecological conditions of the Tuzla group of lagoons located in the central part of the Danube-Dniester interfluvium by ensuring and regulating their water exchange with the open sea through artificially created channels in the barrier beach that separates the water body from the sea.

The research presents the results of adaptation of the well-known modern numerical

hydrodynamic model Delft3D Flow Flexible Mesh to the conditions of the Tuzla group of lagoons, as well as the results of its application to determine the effectiveness of various variants for ensuring water exchange with the sea based on the outcomes of scenario mathematical modeling.

In particular, the following variants of channels functioning were studied: (1) a relatively narrow connecting channel at the 2nd km of the barrier beach (near the Burnas Lagoon) together with a wide and deep outlet that existed before 2015 at the 24th km of the barrier beach (near the Shagany Lagoon); (2) a wide controllable connecting channel in the Shagany Lagoon placed on the outlet, alongside with the above-mentioned channel in the Burnas Lagoon; (3) an additional (third) narrow channel at the strip of the barrier beach near the Alibey Lagoon.

The characteristics of the annual cycle of water salinity spatio-temporal variability were used as indicators of the effectiveness of management decisions for ensuring the stability of the lagoons' hydro-ecological conditions.

Based on the analysis of the scenario modeling results it was concluded that the optimum solution of the problem related to stabilizing the hydro-ecological regime of the water body consists in ensuring the constant multidirectional water exchange with the sea through two artificial connecting channels in the barrier beach (both with bottom marks of minus 1.0 m (Baltic Height System) and 60 m and 15 m wide for the Shagany Lagoon and the Burnas Lagoon respectively) throughout the year. This will deny any salinization of the water body over the long term.

For the specified variant the time of complete water renewal with sea water for the main lagoons of the Tuzla group would constitute 8 and 12 months for the Shagany Lagoon and the Alibey/Burnas Lagoons respectively.

Keywords: Tuzlivski Lagoons; water salinity; water exchange with the sea; scenario modeling; water renewal

Подання до редакції : 01. 06. 2022

Надходження остаточної версії : 06. 06. 2022

Публікація статті : 07. 07. 2022

УДК 574.587: 592]: 502.51 (282.05) (477.64)

МІКРО- ТА МАКРОФАУНА ДОННИХ БЕЗХРЕБЕТНИХ ГИРЛОВОЇ ДІЛЯНКИ МАЛОЇ РІЧКИ МОКРА МОСКОВКА В МЕЖАХ МІСТА ЗАПОРІЖЖЯ

К. О. Домбровський, О. Ф. Рильський

*Запорізький національний університет,
вул. Жуковського 66, 69600, Запоріжжя, Україна,
dombrov1717@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6965-6989>*

У сучасний період науково-технічного прогресу антропогенний вплив на довкілля все більш зростає. При цьому форми і ступінь його дуже різноманітні. Одним із прикладних екологічних досліджень є вивчення водних екосистем, у тому числі екосистем малих річок. Малі річки формують водні ресурси, гідрохімічний склад та якість води середніх та великих річок, є складовими природних ландшафтів, сприяють господарській діяльності людини.

Сучасний екологічний стан малих та середніх річок Запорізької області оцінюється за більшістю показників як незадовільний. Головною причиною такого становища є надмірне антропогенне навантаження на екологічні системи малих річок, які дуже відчутно реагують на будь-яке втручання. Одним із наслідків цього процесу є замулення малих річок. Не є виключенням з вище описаної характеристики водних екосистем і мала річка Мокра Московка. Річка протікає по території Запорізької області і на нижній ділянці довжиною близько 11 км протікає у щільно забудованій частині м. Запоріжжя. Гирлова ділянка русла р. Мокра Московка довжиною 2,6 км від гирла до залізничного мосту Запоріжжя-1 – Запоріжжя-2 пролягає по території Олександрівського та Комунарського районів м. Запоріжжя. За час існування гирлова ділянка русла малої річки значно замулилася та знаходиться в незадовільному стані. Цьому сприяє підпір рівнів води Каховського водосховища, добові коливання рівнів води в р. Дніпро, які призводять до зворотних переміщень мас води та розвитку застійних явищ на даній ділянці русла. Крім цього, суттєвим джерелом надходження наносів, сміття та забруднюючих речовин до русла є випуски дощової зливової каналізації міста.

З метою поліпшення екологічного стану та вилучення мулових відкладень у р. Мокра Московка в межах міста проводили розчистку русла упродовж 2004-2013 років. Потужність мулових наносів в річці за нашими даними досягала місцями до 1,0-1,5 м. Для відновлення і підтримання сприятливого гідрологічного режиму та санітарного стану гирлової ділянки русла р. Мокра Московка передбачається провести розчищення гирлової ділянки русла річки від мулових відкладень з використанням технології гідромеханізації та землечерпальними механізмами з води у 2022-2023 р. (планова діяльність).

Метою робіт є вивчення структурної організації донної фауни гирлової ділянки малої річки Мокра Московка в межах урбоекосистеми. Робота ґрунтується на результатах власних гідробіологічних досліджень. Впродовж спостережень 2021 р. на гирловій ділянці водотоку було зареєстровано 53 види донних безхребетних. З усієї кількості видів 21 належали до макрзообентосу, 32 було знайдено в угрупованнях донної мікрофауни. Проведена сапробіологічна оцінка досліджених ділянок річки за індикаторними організмами мікро- та макрзообентосу свідчить, що обстежена частина водотоку належить до α -мезосапробної зони та за класифікацією якості поверхневих вод відповідає брудним водам. Для поліпшення екологічного стану гирлової ділянки р. Мокра Московка необхідно проводити певні заходи щодо біологічного очищення води із використанням сучасних біотехнологічних рішень, розроблених саме в Україні.

Ключові слова: річка Мокра Московка; донна мікрофауна; макрзообентос.

1. ВСТУП

З року в рік стан малих річок погіршується, однак цієї проблеми, як і раніше, не приділяється належної уваги. Малі річки басейну Дніпра, які

становлять понад 90% його річкової мережі, несуть надзвичайно велике антропогенне навантаження. Водой з малих річок забезпечується 18% усіх господарських потреб у басейні. У дрібну гідрографічну мережу скидається 15% усіх стіч-

них вод у басейні і 6% – забруднених. Спроби гідротехнічними заходами (розчищенням) та спрямуванням русел річок, облицюванням їх берегів тощо, припинити зменшення стоку й водності малих річок не тільки не досягли своєї мети, а й призвели до порушення внутрішньо руслових процесів, гідробіологічного режиму, а звідси і зниження якості води. Цей показник за останні десятиріччя знизився майже вдвічі [1].

Екологічний стан малих річок, їх водність та якість води залежать не тільки від внутрішньоводоймних процесів, а й від стану водозбірної площі. Малі річки є першим і дуже вразливим ланцюгом усієї річкової системи. Їх потрібно розглядати в нерозривній єдності з іншими структурними компонентами природних ландшафтів: луками, орними землями, лісами.

На водний режим та річковий стік малих річок істотно впливають – регулювання стоку штучними водоймами, втрата води на випаровування з їх поверхні, відбір підземних вод, агротехнічні та лісотехнічні заходи, осушення та зрошення земель, урбанізовані території, зростання незворотного водоспоживання різними галузями економіки, міжбасейновий перерозподіл стоку тощо.

Найбільшою з малих річок міста Запоріжжя є Мокра Московка (ліва притока р. Дніпро). Її водозбірна площа складає 457 км², довжина – 62 км, а в межах міста близько 11 км. На 3 кілометровій ділянці гирлової частини річка знаходиться у підпорі Каховського водосховища і є фактично відстійником численних промислово-господарських і каналізаційних стоків від розташованих на водозбірній площі заводів і підприємств м. Запоріжжя, а також житлового сектора. Обсяг стоків в окремі місяці у багато разів перевищує природний стік річки, що виключає її спроможність до самоочищення. Внаслідок означених вище забруднень р. Мокру Московку можна віднести до водойм І ступеня забруднення [2].

Річка втратила своє рибогосподарське значення, гирлова ділянка перетворена у відкритий колектор з антисанітарним станом, де будь-яке органічне життя майже неможливе. На замулених ділянках посилено росте очерет звичайний, зменшуючи проточність річки. Ділянка річки, що не знаходиться на підпорі і розташована вище залізничних мостів напрямку Москва – Сімферополь до Передаточинських гранітних кар'єрів – довжиною 8 км, також знаходиться у поганому стані: русло відсутнє, заплава заросла очеретом і перетворилася у болото з гідролізно-дріжджовим і фекальним запахом.

Сучасна глибина ріки Мокра Московка скла-

дає від 0,5 до 1,5 м при замуленні русла у верхів'ї 0,5-1,2 м, в середині течії 0,2-0,5 м та в нижній течії 0,1-0,8 м. Швидкість течії в середньому становить 0,1-0,2 м/с, але не перевищує 0,4 м/с. Заростання русла у верхів'ї очеретом звичайним складає близько 30%, а в середній та нижній течії – 10-25% відповідно. Русло малої річки місцями випрямлене і проходить у штучних водоводах (каналізація) або його перетинає мережа інженерних комунікацій, трубопереїзди і примітивні пішохідні містки. Більшість зазначених споруд побудована без проектів і під час поєнней призводить до підпору, катастрофічних затоплень і підтоплення житлового сектора. До гирлової ділянки водотоку змивається сміття, яке збирається на заплаві і біля житлових будинків внаслідок господарської діяльності. Основним джерелом замулення малої річки можна вважати «самозахоплення» і облаштування у заплаві городів, дачних ділянок, гаражів, а також скид неочищених або недостатньо очищених стічних вод [3].

Бентос річки Мокра Московка вивчався нами з 1998 р., результати цих досліджень було опубліковано раніше [2, 4-6].

Метою робіт є вивчення структурної організації донної фауни гирлової ділянки малої річки Мокра Московка в межах урбоєкосистеми.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Збір донних безхребетних проводився згідно з традиційними методиками [7]. Для відбору проб донної мікрофауни використовували трубчатий, пластмасовий, модернізований пробовідбірник Панова-Павлова (1986) площею захоплення 0,002 м² і висотою 0,21 м [8]. Під час відбору проб макрозообентосу було використано гідробіологічні сачки-скребки (діаметр обруча сачка-скребка – 20-25 см) якими більш зручніше відбирати проби на мілководних ділянках водотоку на глибині до 1,0-1,5 м.

При промивці проб макрозообентосу використовували систему сит із дрібною сіткою (діаметр ячеї 40 мкм) або планктонні сітки з млинового гасу (№19-23). Піщаний ґрунт збовтували і вода із зависсю багаторазово промивалась крізь сито (млиновий гас №34-38). Промитий від залишків ґрунту відібраний матеріал фіксували 4% розчином формальдегіду, в деяких випадках (при вивченні ракоподібних, черевоногих молюсків) – 70% розчином етилового спирту з доповненням 4% розчину формальдегіду.

Подальше камеральне опрацювання проводили за допомогою бінокуляр, розділяючи органі-

зми на основні таксономічні групи (нематоди, олігохети, ракоподібні, личинки комах та ін.). Біомасу визначали зважуванням на вагах з точністю виміру до 1 мг, а щільність – підрахунком окремих таксономічних груп макрозообентосу, з наступним перерахунком на 1 м² дна річки.

При аналізі опрацьованого матеріалу використовувались індекси сапробності зообентосних організмів за методикою Пантле-Букк [9], з використанням значень індивідуальної сапробності та індикаторної значущості організмів [10-14], які відомі із літератури. Залежно від значення індексу сапробності виділяють наступні зони: 0,5-1,5 – олігосапробна (чиста вода), 1,51-2,5 – β-мезосапробна (помірно забруднена вода), 2,51-3,5 – α-мезосапробна (брудна вода), 3,51-4,5 – полісапробна (дуже брудна вода).

Для кількісної оцінки складності структури угруповань тварин використовували індекси видового різноманіття (інформаційний індекс Шеннона), у якому інформація розглядається як міра різноманіття [15]. Цей індекс об'єднує велику кількість інформації щодо щільності та видового складу організмів, включаючи кількість видів їх ступінь домінування.

Різнорманіття, а також і складність структури угруповань гідробіонтів та екосистем, змінюється під впливом різних факторів оточуючого середовища, в тому числі й антропогенних. Складність угруповань зменшується при забрудненні, евтрофікації, ацидофікації вод.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Донна мікрофауна. Донна мікрофауна є інформативно-структурною одиницею водних екосистем, та приймає активну участь у формуванні якості води, є чутливим показником стану водних екосистем. Данні щодо структури й різноманіття цих організмів у водоймах різного типу мають велике значення для моніторингу біорізнорманіття та оцінки екологічного стану водних екосистем.

Нами була досліджена донна мікрофауна річки Мокра Московка на трьох ділянках (станціях) – нижній, середній та верхній, тобто на акваторії водотоку, де саме й буде проводитись планова діяльність з розчистки гирлової ділянки русла малої річки. У межах кожної ділянки (станції) відбирали проби в різних точках (біотопах): у заростях вищих водних рослин і на чистих від макрофітів ділянках літоралі водотоку. На верхній і середній ділянках річки Мокра Московка переважали формації очерету звичайного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.). Мі-

цями в асоціації з ними зустрічались рогіз вузьколистий (*Typha angustifolia* L.), комиш лісовий (*Scirpus sylvaticus* L.), рдесник кучерявий (*Potamogeton crispus* L.) та інші види макрофітів.

Під час дослідження малої річки у весняно-літній (квітень – червень) період 2021 року було встановлено, що температура води досліджених ділянок коливалась у межах 18,5-19,8°C, а показники вмісту розчиненого кисню – 5,2-6,8 мгО₂/дм³.

У складі донної мікрофауни обстеженої акваторії річки Мокра Московка всього виявлено 35 видів безхребетних організмів, які належать до 8 систематичних груп.

При дослідженні зооценозу донної мікрофауни водотоку у літній період на верхній ділянці (район «Автовокзалу») було виявлено 25 таксонів видового рангу бентосних безхребетних з 7 систематичних груп. Максимальною кількістю видів були представлені інфузорії – 15 таксонів (60% від загальної кількості видів). Коловертки були представлені 3 видами і формами, джгутикові та нематоди – 2 таксонами, відповідно. Інші таксономічні групи (олігохети, гіллястовусі ракоподібні та тихоходки) були представлені по одному виду відповідно, таблиця 1-2.

Загальна щільність зооценозу донної мікрофауни дослідженого водотоку на цій верхній ділянці коливалась у межах від 122 екз/см² до 4849 екз/см². В зооценозі мікробентосу малої річки у цей період за щільністю домінували інфузорії, середня щільність яких складала 1448 екз/см² або 77% від загальної середньої щільності зооценозу донної мікрофауни. Серед інфузорій високими середніми показниками щільності характеризувались два види – *Prorodon teres* та *Trithigmostoma cucullulus*, які склали 32% та 25% від середньої щільності інфузорій зооценозу, відповідно. Останній вид також характеризувався високими показниками зустрічальності у складі зооценозу донної мікрофауни дослідженого водотоку.

Нематоди та коловертки мали другорядне значення в угрупованні зооценозу, їх щільність коливалась у таких межах – 91-457 екз/см² та 182-457 екз/см², відповідно. Разом середня щільність цих таксономічних груп зооценозу донної мікрофауни малої річки складала 324 екз/см² або 17% від загальної середньої щільності дослідженого зооценозу. Щільність джгутикових організмів була незначною та коливалась у межах 91-183 екз/см² або 3% від загальної середньої щільності дослідженого зооценозу.

Таблиця 1 – Видовий склад донної протистофауни р. Мокра Московка у літній період 2021 р.

Table 1 – Species composition of benthic protistofauna of the Mokra Moskovka River during the summer period 2021

Види (таксони)	Ділянки		
	верхня	середня	нижня
Джгутикові			
1. <i>Euglena</i> sp.	+	+	–
2. <i>Euglena gracilis</i> Klebs	+	+	–
Інфузорії			
1. <i>Aspidisca cicada</i> (Muller) Claparede and Lachmann	+	–	–
2. <i>Actinobolia radians</i> Stein	–	–	+
3. <i>Chilodonella uncinata</i> (Ehrenberg)	+	–	–
4. <i>Coleps hirtus</i> Nitzsch	+	+	–
5. <i>Glaucoma scintillans</i> Ehrenberg	–	+	–
6. <i>Hemiphrys</i> sp.	–	+	–
7. <i>Euplotes aphinis</i> Dujardin	+	–	–
8. <i>Euplotes patella</i> Genetics	+	–	–
9. <i>Kondyliostoma vorticella</i> Ehrenber	–	–	+
10. <i>Litonotus lamella</i> Shewlakoff	+	–	–
11. <i>Paramecium caudatum</i> Ehrenberg	+	+	–
12. <i>Paramecium bursaria</i> (Ehrenberg)	+	–	–
13. <i>Prorodon ovum</i> (Ehrenberg) Kahl	–	+	–
14. <i>Prorodon teres</i> (Ehrenberg) Foissner, Berger & Kohmann	+	+	–
15. <i>Spirostomum minus</i> Roux	+	+	–
16. <i>Spirostomum ambiguum</i> (Müller) Ehrenberg	+	–	–
17. <i>Prorodon</i> sp.	+	–	–
18. <i>Pseudoceronopsis</i> sp.	+	+	–
19. <i>Tachysoma pellationella</i> (Muller et Stein)	+	–	–
20. <i>Trithigmostoma cucullulus</i> (Muller) Jankowski	+	+	+
Кількість видів	17	11	3

Таблиця 2 – Видовий склад донної мікрофауни р. Мокра Московка у літній період 2021 р.

Table 2 – Species composition of the bottom microfauna of the Mokra Moskovka River during the summer period 2021

Види (таксони)	Ділянка		
	верхня	середня	нижня
Коловертки			
1. <i>Bdelloidea</i> gen. sp.	–	+	–
2. <i>Proales disipens</i> (Ehrenberg)	–	+	–
3. <i>Rotaria citrina</i> (Ehrenberg)	+	+	–
4. <i>Rotaria</i> sp.	–	+	–
5. <i>Colurella colurus</i> (Ehrenberg)	+	–	–
6. <i>Euchlanis dilatata</i> Myers	+	–	–
Нематоди			
1. <i>Ironus ignavus</i> Bastian	+	+	–
2. <i>Nematoda</i> gen. sp ₁ .	+	+	–
3. <i>Nematoda</i> gen. sp ₂ .	–	+	–
Олігохети			
1. <i>Chaetogaster limnaei</i> Pollock	+	–	–
Гіллястовусі ракоподібні			
1. <i>Bosmina longirostris</i> Müller	+	–	–
Тихоходки			
1. <i>Tardigrada</i> gen. sp.	+	–	–
Черевійчасті черви			
1. <i>Chaetonotus schultzei</i> Metschnikoff	–	–	+
Кількість видів	8	7	1

Представленість інших таксономічних груп (олігохети, тихоходки, гіллястовусі ракоподібні) у загальній середній щільності зооценозу донної мікрофауни річки була низькою та складала 2,4%, внаслідок того, що гідробіонти зазначених груп в зооценозі мікробентосу зустрічались випадково і в обмеженій кількості.

При дослідженні зооценозу донної мікрофауни річки Мокра Московка на середній ділянці (район Комунальної установи «Запорізького обласного шкірно-венерологічного клінічного диспансеру») було виявлено 18 видів мікробентосних організмів, які належать до чотирьох таксономічних груп. Максимальною кількістю видів були представлені інфузорії – 9 таксонів (53% від загальної кількості видів). Коловертки та нематоди були представлені 4 та 3 формами відповідно, джгутикові – 2 таксонами, див. табл. 1-2.

В дослідженому зооценозі мікробентосу малої річки за щільністю домінували інфузорії, щільність яких коливалась у межах 91-2012 екз/см². Середня щільність інфузорій на цій ділянці в дослідженому зооценозі водотоку складала 635 екз/см² або 49% від загальної середньої щільності зооценозу донної мікрофауни. За досліджений період високими середніми показниками щільності серед інфузорій характеризувались два види – *P. caudatum* та *Trithymostoma cucullulus*, які складали 46% та 20% від середньої щільності інфузорій зооценозу, відповідно.

Високі середні показники щільності джгутикових (457 екз/см²) були обумовлені головним чином значним розвитком виду – *Euglena gracilis*, середня щільність якого складала 80% від середньої щільності джгутикових дослідженого зооценозу. Щільність нематод була невисокою та коливалась у межах 91-640 екз/см² або 13% від загальної середньої щільності дослідженого зооценозу донної мікрофауни річки Мокра Московка. Коловертки складали незначну складову середньої щільності зооценозу мікробентосу дослідженого водотоку та становили лише 3,5% від загальної середньої щільності зооценозу.

Порівнюючи структурну організацію зооценозів донної мікрофауни двох ділянок (верхньої та середньої) у весняно-літній період 2021 року можна стверджувати, що структурна організація нижче розташованого за течією малої річки зооценозу була спрощеною. Це підтверджується певними структурними показниками даного зооценозу мікробентосу: 1) зменшенням майже в 2 рази кількості таксономічних груп які були ви-

явлені в зооценозі (з 7 до 4 таксономічних груп); 2) зменшенням в 2 рази середньої щільності домінуючої таксономічної групи (інфузорій) в зооценозі (з 1260 екз/см² до 625 екз/см²); 3) зменшенням майже в 4,5 рази загальної середньої щільності зооценозу донної мікрофауни річки Мокра Московка (з 5721 екз/см² до 1295 екз/см²); 4) збільшенням показника коефіцієнта сапробності (з 2,9 до 3,15), що вказує на погіршення сапробіологічних умов на цій ділянці водотоку (α -мезосапробна зона).

Донна мікрофауна нижньої ділянки річки Мокра Московка характеризувалась низьким видовим різноманіття водних безхребетних. На даній ділянці водотоку зареєстровано 4 види гідробіонтів, які відносяться до 2 систематичних груп. Серед інфузорій було виявлено 3 таксони, черевовійчасті черви були представлені 1 видом. Зооценоз мікробентосу в основному складався з альфа- та бета-сапробних організмів, тобто видів індикаторів органічного забруднення води. Загальна щільність зооценозу донної мікрофауни не перевищувала 70 екз/см².

Макрозообентос. Для оцінки стану та вивчення гідробіологічних процесів на досліджених ділянках річки Мокра Московка нами було досліджено якісний та кількісний склад угруповань макрозообентосу.

При вивченні макрозообентосу дослідженої акваторії річки Мокра Московка нами було всього виявлено 21 вид донних безхребетних тварин, які належать до 10 систематичних груп. Найбільшим видовим різноманіттям характеризувались червоногі молюски (5 видів). Личинок комарів-дзвінців було зареєстровано – 3 види, п'явок, личинок бабок, твердокрилих, личинок волохокрильців і одноденок – по 2 види, інші групи (олігохети, ізоподи і личинки мокреців) представлені одним таксоном, таблиця 3.

Щільність макрозообентосу коливалась у межах 650-800 екз/м². Найбільше видове різноманіття макрозообентосу нами було відмічено на нижній ділянці річки, де донне угруповання складалось із 8 систематичних груп й було представлено 13 видами.

Аналізуючи співвідношення таксономічних груп макрозообентосу на цій ділянці водотоку слід відмітити, що переважали за щільністю ізоподи (59,4%), які були представлені виключно – *Asellus aquaticus* та червоногі молюски, загальна щільність яких складала 115 екз/м², а біомаса – 7,2 г/м². Другорядне значення в угрупованні донних тварин мали личинки комарів-дзвінців, щільність яких складала 12,5% від загальної

Таблиця 3 – Видовий склад угруповань макрозообентосу р. Мокра Московка у літній період 2021 р.

Table 3 – Species composition of macrozoobenthos groups in the Mokra Moskovka River during the summer period 2021

Види (таксони)	Ділянки		
	верхня	середня	нижня
Олігохети			
1. <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> Claparede	+	–	–
П'явки			
1. <i>Herpobdella octoculata</i> (L.)	+	–	+
2. <i>Glossiphonia complanata</i> (L.)	–	–	+
Личинки бабок			
1. <i>Platycnemis pennipes</i> (Pallas)	+	–	–
2. <i>Ischnura elegans</i> (Vander Linden)	+	–	+
Личинки одноденок			
1. <i>Cloeon (Cloeon) dipterum</i> L.	–	+	+
2. <i>Baetis</i> sp.	–	–	+
Личинки волохокрильців			
1. <i>Hydropsiche angustipennis</i> (Curtis)	+	+	–
2. <i>Athripsodes aterrimus</i> (Stephens)	–	–	+
Личинки комарів-дзвінців			
1. <i>Ablabesmyia gr. lentiginosa</i> Fries	+	+	+
2. <i>Chironomus plumosus</i> (Linnaeus)	–	+	–
3. <i>Orthocladius</i> gen. sp.	–	+	–
Личинки двокрилих			
1. <i>Ceratopogoniedae</i> sp.	–	–	+
Водні твердокрилі			
1. <i>Acilius sulcatus</i> (L.)	+	–	–
2. <i>Hydrobius</i> sp.	+	–	–
Рівноногі ракоподібні (ізоподи)			
1. <i>Asellus aquaticus</i> (Linnaeus)	+	+	+
Червоногі молюски			
1. <i>Planorbis planorbis</i> (Linne)	+	–	–
2. <i>Lymnaea auricularia</i> (L.)	–	+	+
3. <i>Lymnaea palustris</i> (O.F.Muller)	+	–	+
4. <i>Bithynia tentaculata</i> (L.)	–	–	+
5. <i>Bithynia troscheli</i> (Paasch)	–	–	+
Кількість видів	11	7	13

щільності макрозообентосу. За біомасою на нижній ділянці малої річки домінували виключно червоногі молюски (26,7% біомаси), головним чином, за рахунок *Lymnaea auricularia*.

Невисокою кількістю видів угруповання макрозообентосу було представлено на середній ділянці обстеженої акваторії р. Мокра Московка. Всього тут було ідентифіковано 7 видів макрозообентосу, які відносяться до 5 систематичних груп. (личинки одноденок, личинки волохокрильців, личинки комарів-дзвінців, ізоподи та червоногі молюски). На цій ділянці малої річки домінували як за щільністю так і за біомасою личинки волохокрильців – *Hydropsiche angustipennis*.

На верхній ділянці річки Мокра Московка угруповання макрозообентосу було представлено 11 видами, які відносяться до 8 систематич-

них груп. На замулених ґрунтах тут переважали за щільністю олігохети (малощетинкові черві) та п'явки, які складали 46,2% та 15,4% від загальної щільності донного угруповання, відповідно. За біомасою на цій ділянці водотоку переважали червоногі молюски та олігохети, які складали 39,6% та 20,8% від загальної біомаси макрозообентосу.

Величина індексу видового різноманіття на досліджених ділянках річки Мокра Московка коливалась в межах 2,36-3,03 біт/екз. Показник видового різноманіття макрозообентосу в середньому дорівнював 2,48, що пов'язано з більш рівномірним розподілом гідробіонтів із різних таксономічних груп.

Постійно на всіх обстежених ділянках річки Мокра Московка в макрозообентосі зустрічалися тільки два види, це личинки комарів-дзвінців

(*Ablabesmyia* gr. *lentiginosa*) та рівноногі раки (*Asellus aquaticus*).

При оцінці сапробіологічного стану досліджених ділянок р. Мокра Московка за даними макрозообентосу було виявлено 17 індикаторних видів, із яких молюсків – 4, п'явок, личинок бабок, личинок комарів-дзвінців, личинок одноденок, личинок волохокрильців – по 2, олігохет, твердокрилих, ізопод – по одному виду. Серед відмічених індикаторних видів безхребетних 10 (59%) – відноситься до бета-мезосапробів, 5 (29%) – до альфа-мезосапробів і 2 (12%) – до полісапробів.

Порівнюючи данні сапробності вод досліджених ділянок р. Мокра Московка слід зазначити, що за цей період показники індексу сапробності коливались у певних межах, від 2,69 до 2,89. Проведена сапробіологічна оцінка досліджених ділянок річки за показниками макрозообентосу свідчить, що обстежена частина водотоку належить до α -мезосапробної зони, що за класифікацією якості поверхневих вод відповідає брудним водам.

Середня ж величина індексу (2,77) свідчить про переважання на цій ділянці річки α -мезосапробних умов. Це співпадає з оцінкою екологічного стану річки за мікробіологічними показниками, згідно яких річка відноситься до α -мезосапробних – полісапробних водотоків.

Внаслідок того, що до гирлової ділянки річки Мокра Московка потрапляють зливові стічні води міста, які містять біогенні елементи, необхідно проводити заходи щодо локального біологічного очищення води обстежених ділянок водотоку. Для цього необхідно в місцях локального забруднення води малої річки розмістити плаваючі несучі елементи у вигляді «плотиків», розміром 1,5×0,8 м, до нижньої поверхні яких закріпити волокнисті носії типу «ВІА» для іммобілізації (прикріплення) мікроорганізмів та інших гідробіонтів, які і будуть очищати воду від органічних речовин, біогенних елементів та інших забруднювачів води. Запропонована біотехнологія використовується для очищення зливових стічних вод промислових підприємств, поверхневих вод і навіть токсичних стічних вод які містять гексаметилендіамін.

При використанні запропонованої біотехнології у гирловій частині річки Мокра Московка підвищиться видове різноманіття гідробіонтів, що призведе до відновлення процесів природного самоочищення цієї водної екосистеми. Впровадження заходів з локального біологічного очищення води у річці дозволить очікувати суттєвий природоохоронний ефект щодо поліпшен-

ня екологічного стану водної екосистеми, зокрема щодо зниження її евтрофікації та темпів «цвітіння» водотоку.

Для запобігання забруднення води річки Мокра Московка різноманітним сміттям, що приноситься течією до зони проектних планових робіт, необхідно встановити механічні решітки-уловлювачі в районі залізничних мостів. А також, встановити чіткий графік для комунальних служб по очищенню решіток і вивезенню сміття. Такі заходи дозволять не тільки покращити загальний гідрологічний режим річки, але і припинити забруднення полімерним сміттям основного джерела питної води України – води річки Дніпро.

4. ВИСНОВКИ

Встановлено, що за досліджуваний період зооценоз донної мікрофауни річки Мокра Московка був представлений 32 видами мікробезхребетних, які належать до семи таксономічних груп. Переважали інфузорії – 18 таксонів (69% від загальної кількості видів). Коловертки були представлені 6 формами, джгутикові та нематоди – двома та трьома таксонами, відповідно. Кількісні показники розвитку донної мікрофауни знаходились у межах 1295-1879 екз/см². За показником сапробності розрахованим за загальною донною мікрофауною стан малої річки характеризувався як забруднена, а індекс сапробності був у межах 2,9-3,15. В цілому встановлена певна закономірність – нижче розташовані ділянки водотоку характеризуються високими показниками індексу сапробності, а видовий склад та щільність зооценозу донної мікрофауни знижується. Впродовж спостережень 2021 р. в зооценозі макрозообентосу було зареєстровано 21 вид безхребетних, серед яких найбільшим видовим різноманіттям характеризувались червоногі молюски (5 видів). Загальна щільність макробезхребетних бентосу змінювалась у межах від 650-800 екз/м², що свідчить про низький розвиток даного зооценозу у межах гирлової ділянки річки Мокра Московка. Значення індексу Шеннона для макрозообентосу становили 2,48 (2,36-3,03) біт/екз, що може свідчити про сприятливі умови існування цього комплексу безхребетних. Відповідно значенням індексу сапробності, розрахованого за індикаторними видами макрозообентосу обстежена частина водотоку належить до α -мезосапробної зони, що за класифікацією якості поверхневих вод відповідає брудним водам.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Екологічне оздоровлення Дніпра / Шевчук В., Мазуркевич О., Навроцький В. та ін. Київ : Геопринт, 2001. 267 с.
2. Домбровський К. О., Корж О. П. До питання про стан річки Мокра Московка. *Сучасні проблеми екології* : тези доповідей Всеукр. конф. молодих вчених, 7-9 жовтня. Запоріжжя, 2004. С. 117-119.
3. Домбровський К. О., Гурський А. О., Кирилах О. І. Зооперифітон річки Мокра Московка в межах м. Запоріжжя та процеси самоочищення лотичних водних екосистем. *Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб.* Вып. 93. Київ : Техніка, 2010. С. 111-115.
4. Домбровський К. О. Макрозообентос малої річки Мокра Московка в умовах промислового забруднення. *Проблеми екології та охорони природи техногенного регіону*. 2003. Вып. 3. С. 96-106.
5. Домбровський К. О., Муленко М. А., Міхіна І. І. Макрозообентос урбанізованої малої річки Мокра Московка. *Вісник Запорізького державного ун-ту: Збірник наукових статей. Фізико-математичні науки. Біологічні науки*. 2004. №2. С. 134-137.
6. Домбровський К. О., Корж О. П. Гідробіологічні особливості водойм верхів'я Каховського водосховища в умовах антропогенного забруднення. *Вісник Запорізького державного ун-ту: Збірник наукових статей. Фізико-математичні науки. Біологічні науки*. 2006. №1. С. 64-70.
7. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / Арсан О. М., Давидов О. А., Дьяченко Т. М. та ін.; за ред. В.Д. Романенко. НАН України Ін-т гідробіології. Київ : ЛОГОС, 2006. 408 с.
8. Панова В. Е., Павлов А. М. Методика количественного учета водных беспозвоночных в зарослях камыша и тростника. *Гидробиол. журнал*. 1986. Т. 22(6). С. 87-88.
9. Галкіна А.А., Заморов В.В. Сапробіологічний аналіз якості води лимана-водосховища Сасик за організмами макрозообентосу. *Природничий альманах (біологічні науки). Збірник наукових праць*. 2019. Вип. 26. С. 24-36.
10. Олексив І. Т. Показатели качества природных вод с экологической позиции. Львів: Світ, 1992. 243 с.
11. Сладечек В. Общая биологическая схема качества воды. *Санитарная и техническая гидробиология: материалы I съезда ВГБО*. Москва: Наука, 1967. С. 26-31.
12. Тодераш И. К. Функциональное значение хирономид в экосистемах водоемов Молдавии. Кишинев: Штиница, 1984. 181 с.
13. Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. III. Методы биологического анализа. Приложение 1. Индикаторы сапробности / под ред. Л.С. Козина. Москва: изд-во СЭВ, 1997. 92 с.
14. Uzunov I., Kosel V., Sladecsek V. Indicator value of Freshwater Oligochaeta. *Acta hydrobiol.* 1988. 16(2). Pp. 173-186.
15. Шеляг-Сосонко Ю. Р., Ємельянов І. Г. Концепція біорізноманіття в аспекті функціонування та охорони

біосистем і ландшафтів. *Біорізноманіття Карпатського біосферного заповідника*. Київ: ІнтерЕкоЦентр, 1997. С. 478-495.

REFERENCES

1. Shevchuk, V., Mazurkevych, O. & Navrotskyi, V. et al. (2001). *Ekologichne ozdorovlennia Dnipro [Ecological rehabilitation of the Dnieper]*. Kyiv: Neoprynt. (in Ukr.)
2. Dombrovskiy, K.O. & Korzh, O.P. (2004). Do pyannia pro stan richky Mokra Moskovka. [To a question on a condition of the river Mokra Moskovka]. *Tezy dopovidei Vseukr. konf. molodykh vchenykh "Suchasni problemy ekologii" [Abstracts of reports All-Ukrainian. conf. of young scientists "Modern problems of ecology"]*, 7-9 october. Zaporizhzhia, pp. 117-119. (in Ukr.)
3. Dombrovskiy, K.O., Hurskyi, A.O. & Kyrylakha, O.I. (2010). Zooperyfiton richky Mokra Moskovka v mezhakh m. Zaporizhzhia ta protsesy samoochyschennia lotychnykh vodnykh ecosystem [Zooperyphyton of the Mokra Moskovka River within Zaporizhzhia city and self-purification processes of lotic aquatic ecosystems]. *Kommunalnoe khozyaystvo gorodov: nauch.-tekh. sb. [Municipal services of cities: scientific and technical. collection]*, 93. Kiev: Tekhnika, pp. 111-115. (in Ukr.)
4. Dombrovskiy, K.O. (2003). Makrozoobentos maloi richky Mokra Moskovka v umovakh promyslovoho zabrudnennia [Macrozoobenthos of the small river Mokra Moskovka in the conditions of industrial pollution]. *Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogennoho regiona [Problems of ecology and nature protection of a technogenic region]*, 3, pp. 96-106. (in Ukr.)
5. Dombrovskiy, K.O., Mulenko, M.A. & Mikhina, I.I. (2004). Makrozoobentos urbanizovanoi maloi richky Mokra Moskovka [Macrozoobenthos of small river Mokra Moskovka]. *Visnyk Zaporizkoho derzhavnoho un-tu: Zbirnyk naukovykh statei. Fyzyko-matematychni nauky. Biologichni nauky [Bulletin of Zaporizhia State University: Collection of scientific articles. Physical and mathematical sciences. Biological sciences]*, 2, pp. 134-137. (in Ukr.)
6. Dombrovskiy, K.O. & Korzh, O.P. (2006). Hidrobiologichni osoblyvosti vodoim verkhivya Kakhovskoho vodoshkovysha v umovakh antropohennoho zabrudnennia [Hydrobiological peculiarities reservoirs of the upper Kakhovka reservoir in conditions under anthropogenic influence]. *Visnyk Zaporizkoho derzhavnoho un-tu: Zbirnyk naukovykh statei. Fyzyko-matematychni nauky. Biologichni nauky [Bulletin of Zaporizhia State University: Collection of scientific articles. Physical and mathematical sciences. Biological sciences]*, 1, pp. 64-70. (in Ukr.)
7. Arsan, O.M., Davydov, O.A., Diachenko, T.M. et al (2006). *Metody hidroekologichnykh doslidzhen poverkhnelykh vod [Methods of hydroecological research of surface waters]*. Edited by V.D. Romanenko. NAS of Ukraine, Institute of hydrobiology. Kyiv: LOHOS. (in Ukr.)
8. Panova, V.E. & Pavlov, A.M. (1986). [Methodology for

- quantitative accounting of aquatic invertebrates in reed and reed thickets]. *Gidrobiol. zhurnal [Hydrobiological journal]*, 22(6), pp. 87-88. (in Russ.)
9. Halkina A.A., Zamorov V.V. (2019). Saprobiohichnyi analiz yakosti vody lymana-vodoskhovyshcha Sasyk za orhanizmy makrozoobentosu [Saprobiohichnyi analiz of the water quality of Sasyk reservoir are shown on the organisms of macrozoobenthos]. *Pryrodnychiy almanakh (biolohichni nauky). Zbirnyk naukovykh prats [Scientific bulletin of natural sciences (biological sciences)]*, 26, pp. 24-36. (in Ukr.)
10. Oleksiv, I.T. (1992). *Pokazateli kachestva prirodnykh vod s ekologicheskoy pozitsii [Indicators of the quality of natural waters from an ecological point of view]*. Lviv: Svit. (in Russ.)
11. Sladeczek, V. (1967). Obschaya biologicheskaya skhema kachestva vody [General biological diagram of water quality]. *Materialy I s"ezda VGBO: Sanitarnaya i tekhnicheskaya gidrobiologiya [Materials of 1th congress: Sanitary and technical hydrobiology]*. Moscow: Nauka, pp. 26-31. (in Russ.)
12. Toderash, I.K. (1984). *Funktsional'noe znachenie khironomid v ekosistemakh vodoemakh Moldavii [Functional significance of chironomids in ecosystems of water bodies of Moldova]*. Kishinev: Shtinica. (in Russ.)
13. Kozina, L.S. (ed). (1997). *Unifitsirovannye metody issledovaniya kachestva vod [Unified water quality research methods]*. Ch. III: *Metody biologicheskogo analiza [Biological analysis methods]*. Annex 1: *Indikatory saprobnosti [Saprobity indicators]*. Moscow: Publ. SEV. (in Russ.)
14. Uzunov, I., Kosel, V. & Sladeczek, V. (1988). Indicator value of Freshwater Oligochaeta. *Acta hydrobiol.*, 16(2), pp. 173-186.
15. Sheliakh-Sosonko, Yu.R. & Yemelianov, I.H. (1997). Kontsepsiia bioriznomanittia v aspekti funktsionuvannia ta okhorony biosystem i landshaftiv [The concept of biodiversity in the aspect of the function and protection of biosystems and landscapes]. *Bioriznomanittia Karpatskoho biosferneho zapovidnyka [Biodiversity of the Carpathian Biosphere Reserve]*. Kyiv: InterEkoTsentr, pp. 478-495. (in Ukr.)

MICRO- AND MACROFAUNA OF BENTHIC INVERTEBRATES OF THE ESTUARY SECTION OF THE MOKRA MOSKOVKA, A SMALL RIVER IN THE CITY OF ZAPORIZHZHIA

K. O. Dombrovskiy, A. F. Rylsky

Zaporizhzhia National University,
66, Zhukovskogo St., 69600 Zaporizhzhia, Ukraine,
dombrov1717@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6965-6989>

Nowadays, in the period of scientific and technological progress, the anthropogenic impact on the environment keeps increasing. At the same time, its forms and its degree are very diverse. The study of aquatic ecosystems, including ecosystems of small rivers, is one of the applied environmental researches. Small rivers form water resources, hydrochemical composition and water quality of medium and large rivers. They form natural landscapes and contribute to human economic activities.

Most of the indicators classify the current environmental state of small and medium rivers of Zaporizhzhia Region as unsatisfactory. The main reason for this situation is an excessive anthropogenic load on environmental systems of small rivers that have a noticeable reaction to any interference. One of the consequences of this process includes siltation of small rivers. A small river Mokra Moskovka is not an exception to the above-described characteristics of aquatic ecosystems. The river flows through the territory of Zaporizhzhia Region and its lower part of about 11 km long flows in the densely built-up part of the City of Zaporizhzhia. The mouth section of the Mokra Moskovka River is 2.6 km long and runs through the territory of Aleksandrovsky and Kommunar'sky districts of Zaporizhzhia from the river's mouth to the Zaporizhzhia-1-Zaporizhzhia-2 railway bridge. Over the years of its existence, the mouth section of the small river's bed silted up considerably and has an unsatisfactory condition. This is due to the rising of the Kakhovka Reservoir water level and daily fluctuations of the Dnipro's water level that together lead to the reverse movement of water masses and emergence of stagnant phenomena within the studied portion of the river's bed. In addition, the outlets of the municipal rainwater

drainage system present a significant source of the sediment, debris and pollutants entering the river.

In order to improve the environmental condition of the Mokra Moskovka and remove its silt sediments within the bounds of the city, the riverbed was being cleared during 2004-2013. Our data indicate that the thickness of the river's silt sediments reaches 1.0-1.5 m in some places. To restore and maintain favorable hydrological regime and sanitary condition of the mouth section of the Mokra Moskovka it is planned to clean the mouth section of the river channel from silt sediments using hydromechanization technologies and dredging mechanisms in 2022-2023 (scheduled activities).

The research is aimed at studying the structural organization of the bottom fauna of the estuary section of a small river Mokra Moskovka within the urban ecosystem. The work is based on the results of our own hydrobiological research. During the observation that took place in 2021 53 species of benthic invertebrates were recorded at the mouth of the watercourse. It was found that, out of the total number, 21 species belonged to the macrozoobenthos and 32 – to the benthic microfauna groupings. The conducted saprobiological assessment of the studied river sections for the indicated organisms of micro- and macrozoobenthos revealed that the surveyed part of the watercourse belongs to the α -mesosaprobic zone and is classified as "polluted waters" according to the surface water quality classification. In order to improve the environmental condition of the mouth section of the Mokra Moskovka River it is necessary to implement certain measures of biological water treatment using modern biotechnological solutions developed in Ukraine.

Key words: the Mokra Moskovka River; benthic microfauna; macrozoobenthos.

Подання до редакції : 29. 11. 2021

Надходження остаточної версії : 05. 04. 2022

Публікація статті : 07. 07. 2022

УДК 502:504

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ МІСТА ОДЕСА ДІОКСИДОМ АЗОТУ

А. В. Чугай, В. В. Терзема

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, avchugai@ukr.net

В Україні у великих містах з високою концентрацією населення якість атмосферного повітря здебільшого не відповідає вимогам. Для Одеси якість атмосферного повітря є критичною важливою складовою, оскільки місто є рекреаційним і курортним центром України. Поряд з цим Одеса – місто мільйонник з великою кількістю автотранспорту, вантажоперевезень через знаходження на території міста морського порту. Однією з основних забруднюючих речовин є діоксид азоту, основним джерелом надходження якого у повітряний басейн є автотранспорт.

У роботі представлено результати апробації окремих методів короткострокового прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря м. Одеса діоксидом азоту. В якості вихідних даних використані матеріали Національної доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні, дані спостережень за забрудненням атмосферного повітря на мережі стаціонарних пунктів.

Отримані результати прогнозу у зимовий період за методом УкрНДГМІ показали, що динаміка зміни фактичних значень показника Q співпадає з прогностичними значеннями даного показника. У літній період фактичне значення Q майже в кожному випадку співпадало з прогностичними показниками. Справджуваність прогнозу за методом УкрНДГМІ в зимовий період в середньому складала 96,6 %, у літній період – 98,3 %. За методом розпізнавання образів у зимовий і літній періоди відсоток справджуваності прогнозів склав 67 %.

Метод УкрНДГМІ виявився більш надійнішим, ніж метод розпізнавання образів. Низький відсоток справджуваності за методом розпізнавання образів може бути пов'язаний з малим розкидом класів забруднення в даній вибірці, а також зі спрямованістю методики на визначення класу забруднення, а не рівня забруднення. Недоліком використання методу УкрНДГМІ є неможливість його використання в осінній та весняний періоди.

Прогнозування забруднення атмосферного повітря є одним з основних способів вирішення проблем якості повітря у промислово-міських агломераціях. Розробка ефективної прогностичної схеми забруднення повітряного басейну міста може дозволити превентивно реагувати на погіршення якості атмосферного повітря.

Ключові слова: прогноз забруднення; інтегральний показник; справджуваність.

1. ВСТУП

У великих містах з високою концентрацією населення якість атмосферного повітря здебільшого не відповідає вимогам, що можна пояснити великою кількістю автотранспорту, густотою забудови і численними промисловими підприємствами. Для Одеси якість атмосферного повітря є критичною важливою складовою, оскільки місто є рекреаційним і курортним центром України. Місто Одеса є великим мегаполісом, населення якого зростає з кожним роком. Також збільшуються кількість джерел забруднення атмосферного повітря (переважно пересувних), що знижує якість повітря і, як наслідок, призводить до погіршення здоров'я мешканців міста.

Загальний рівень забруднення атмосферного повітря в Україні за індексом забруднення атмосфери становив у 2020 р. згідно Національної доповіді про стан довкілля України 7,0 і оцінювався як високий [1].

Однією з основних забруднюючих речовин (ЗР) є діоксид азоту (NO_2), основним джерелом надходження якого у повітряний басейн є автотранспорт. За відсотковим співвідношенням обсяг викидів NO_2 від пересувних джерел забруднення в Україні у 2020 р. становив 10,6 % (близько 190 тис. т) [1].

З метою покращення стану атмосферного повітря важливим є прогнозування, що дозволяє визначати зміни рівня забруднення певною ЗР в атмосферному басейні міста при стабільно незмінних викидах комплексу речовин.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є порівняльний аналіз окремих методів короткострокового прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря м. Одеса діоксидом азоту.

В якості вихідних даних використані матеріали Національної доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні, дані спостережень за забрудненням атмосферного повітря на мережі стаціонарних пунктів спостережень за грудень 2016 – серпень 2017 рр. Також окремі метеорологічні характеристики були визначені за допомогою ресурсу [2].

Сучасні мегаполіси, такі як Одеса, займають величезну територію (близько десяти – сотень квадратних кілометрів). Тому концентрації ЗР в атмосфері можуть змінюватися під впливом різних мезо- і макромасштабних процесів, що проходять в атмосферному повітрі [3]. Саме тому велика увага приділяється розгляду метеорологічних параметрів, які впливають на перенесення шкідливих домішок, і умов стійкості атмосфери під час процесів відповідних масштабів.

У роботі [4] авторами було представлено результати використання методу короткострокового прогнозу рівня забруднення повітряного басейну м. Одеса NO_2 в літній період. Як прогностичний метод було використано методику УкрНДГМІ [5], апробовану пізніше у роботах [6, 7].

У даній роботі розроблена схема прогнозу і для зимового періоду (грудень, січень, лютий). Прогнозувалась середня за добу і по місту нормована концентрація Q .

У прогностичну схему включені такі показники:

- температура повітря (t) для зимового та літнього періодів в приземному шарі в 03:00 і 15:00 год.;
- напрямок (D) та швидкість вітру (V) у строки 03:00 і 15:00 год.;
- тип синоптичного процесу (C) в 03:00 год.;
- середня за добу і по місту нормована концентрація ЗР за попередню добу (Q').

Оцінка справджуваності проводиться відповідно до груп забруднення (табл. 1).

Іншої прогностичною схемою був метод розпізнавання образів (МРО).

Розпізнавання образів – це віднесення вихідних до певного класу за допомогою виділення існуючих ознак або властивостей, що характеризують ці дані, із загальної сукупності ознак.

Таблиця 1 – Оцінка справджуваності прогнозу [8]
Table 1 – Assessment of the forecast reliability

№ групи	Ступінь забруднення атмосфери	Градація	Допустима градація, при якій прогноз вважається справджуваним
1.	Понижене	$\leq 0,7$	$\leq 0,9$
2.	Помірне	$0,8 - 1,3$	$0,6 - 1,5$
3.	Високе	$\geq 1,4$	$\geq 1,2$

МРО відноситься до групи синоптико-статистичних моделей прогнозу. Він полягає у визначенні подібності конкретної ситуації з ситуацією, характерною для будь-якої групи рівня забруднення, наприклад, підвищеного, середнього або зниженого. Для розбиття на групи всі значення параметра фонового показника забруднення P розташовуються в порядку зменшення. Зазвичай виділяють 3 групи рівнів забруднення: I група – $P > 0,35$, II група – $0,35 \geq P > 0,20$, III група – $P \leq 0,20$ [8].

Розробка прогностичної схеми зводиться до визначення середніх значень і дисперсій предикторів даної групи концентрацій (високих, середніх або низьких концентрацій). При складанні прогнозу обчислюються «відстань» від передбачуваної ситуації до отриманих груп, і ця ситуація відноситься до групи, до якої мінімальна відстань [9]:

$$\rho_I^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \bar{X}_i^I)^2}{(\sigma_i^I)^2}, \quad (1)$$

де

$$(\sigma_i^I)^2 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (X_{ij}^I - \bar{X}_i^I)^2. \quad (2)$$

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Оскільки прогностична модель УкрНДГМІ заснована на спостереженнях 1999 р., було виконано перерахунок значень метеопараметрів в середнє значення нормованої концентрації NO_2 [5]. На основі перетворених параметрів побудовано рівняння множинної регресії побудовано.

Як зазначалось вище, результати складання прогнозу для літнього періоду наведено авторами у роботі [4]. Наведемо прогностичну схему для зимового періоду.

Рівняння множинної регресії побудовано на основі перетворених параметрів рівняння регресії, які наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри рівняння регресії для NO_2
Table 2 - Regression equation parameters for NO_2

Перетворені предиктори					Вільний член
T_{03}	D_{15}	V_{15}	C	Q'	
0.52	0.43	0.44	0.40	0.80	-1.60

Так, рівняння для NO_2 в зимовий період має вигляд:

$$Q_{NO_2} = 0.52Q(T_{03}) + 0.43Q(D_{15}) + 0.44Q(V_{15}) + 0.40Q(C) + 0.80Q(Q') - 1.60. \quad (3)$$

Розрахувавши за допомогою даного рівняння прогнозовані значення концентрації NO_2 за грудень, січень, лютий 2016 – 2017 рр., було побудовано динаміку фактичних і прогностичних значень Q (рис. 1 – 3).

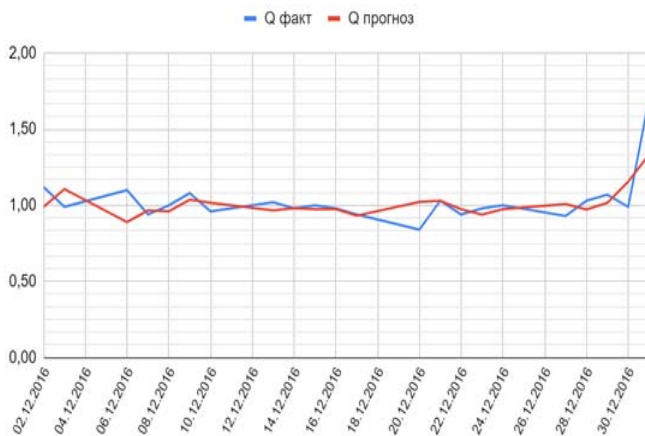


Рис. 1 – Динаміка зміни фактичних і прогностичних значень Q (NO_2 , грудень 2016 р.)
Fig. 1 – Dynamics of change of actual and prognostic Q values (NO_2 , December 2016)

Аналіз рис. 1–3 показав, що динаміка зміни фактичних значень показника Q для NO_2 в м. Одеса у зимовий період 2016 – 2017 рр. співпадає з його прогностичними значеннями.

Для більш точної оцінки адекватності прогностичної моделі було складено таблиці для оцінки справджуваності прогнозів. Так, у грудні 2016 р. були використані дані спостережень за 27 діб, з яких було відкинуто 5, що не відповідали вимогам використання даного методу. З 22 спрогнозованих випадків забруднення 21 випадок відповідав 2 класу забруднення і 1 випадок – 3 класу. При оцінці справджуваності відсоток прогнозів, які потрапили в той самий клас, що й фактичне значення, склав 100 %. Для січня 2017 р. використані дані спостережень за 24 доби, з яких було відкинуто 5. Було спрогнозовано 19 випад-

ків. Всі відповідали 2 класу забруднення. Відсоток справджуваності склав 94,7 %.



Рис. 2 – Динаміка зміни фактичних і прогностичних значень Q (NO_2 , січень 2017 р.)

Fig. 2 – Dynamics of change of actual and prognostic Q values (NO_2 , January 2017)



Рис. 3 – Динаміка зміни фактичних і прогностичних значень Q (NO_2 , лютий 2017 р.)

Fig. 3 – Dynamics of change of actual and prognostic Q values (NO_2 , February 2017)

У лютому 2017 р. використані дані спостережень за 24 доби, з яких було відкинуто 4. Всі спрогнозовані випадки відповідали 2 класу забруднення. Справджуваність склала 95 %.

Зазначимо, що за літній період 2017 р. було складено 60 прогнозів. Справджуваність прогнозів склала 96,67 % (58 прогнозів з 60 справилися). З них 0 випадків високого забруднення, 58 – помірного, 2 – низького.

Для порівняння була застосована інша прогностична схема, а саме прогнозування МРО.

На рис. 4–6 наведено результати прогнозування у зимовий період 2016 – 2017 рр.

На рис. 7–9 наведені результати прогнозування у літній період 2017 р.

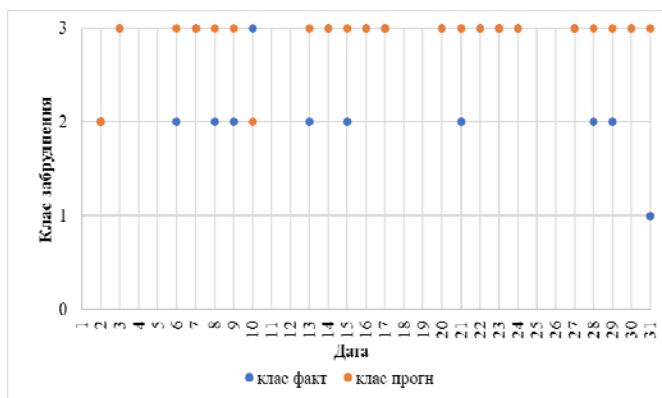


Рис. 4 – Прогноз забруднення параметра P (грудень 2016 р.)
Fig. 4 – Forecast of pollution of parameter P (December 2016)

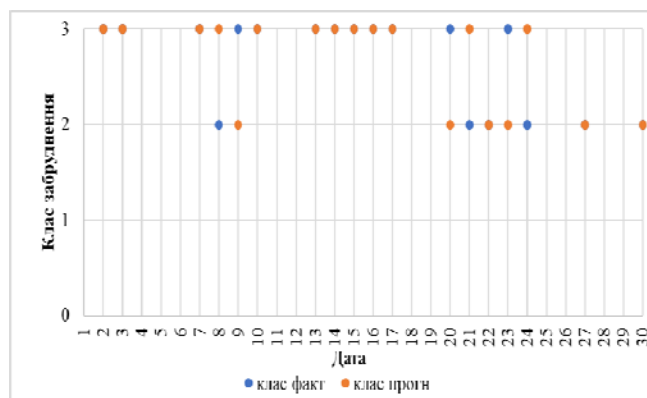


Рис. 7 – Прогноз забруднення параметра P (червень 2017 р.)
Fig. 7 – Forecast of pollution of parameter P (June 2017)

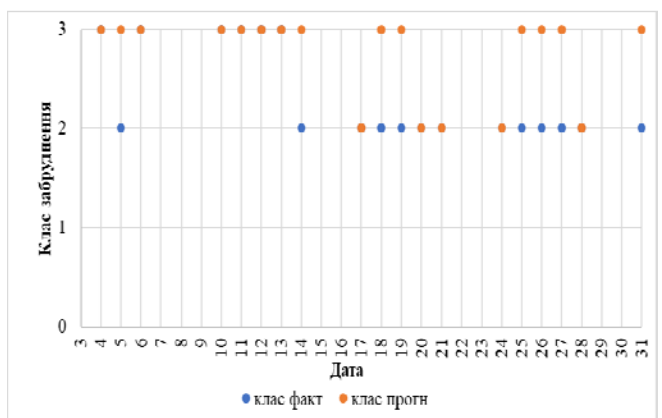


Рис. 5 – Прогноз забруднення параметра P (січень 2017 р.)
Fig. 5 – Forecast of pollution of parameter P (January 2017)

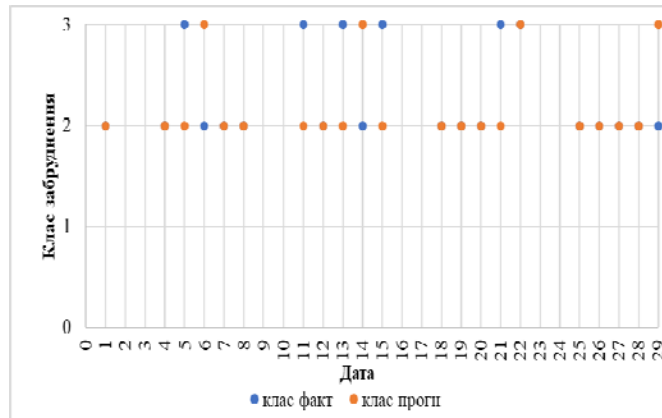


Рис. 8 – Прогноз забруднення параметра P (липень 2017 р.)
Fig. 8 – Forecast of pollution of parameter P (July 2017)

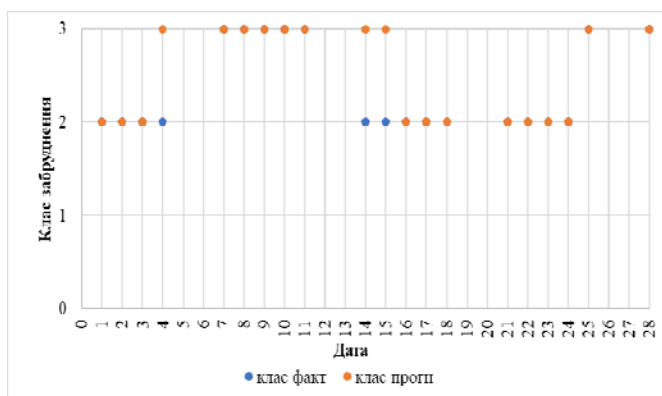


Рис. 6 – Прогноз забруднення параметра P (лютий 2017 р.)
Fig. 6 – Forecast of pollution of parameter P (February 2017)

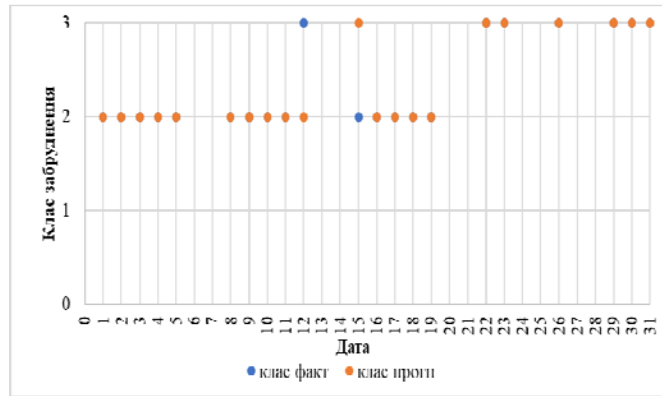


Рис. 9 – Прогноз забруднення параметра P (серпень 2017 р.)
Fig. 9 – Forecast of pollution of parameter P (August 2017)

При прогнозуванні забруднення атмосферного повітря м. Одеса NO_2 у літній і зимовий періоди 2016 – 2017 рр. МРО були використані дані спостережень за 151 добу, з яких було відкинуто 28 днів через невідповідність вимог до використання даних для цього методу. З розрахунку моделі з вибірки лише одне значення потрапило до 1 класу забруднення, тому для даного класу неможливо розрахувати середнє значення і

дисперсію. Після розрахунків для оцінки справджуваності були відкинуті ще значення, які неможливо перевірити, оскільки немає відомостей щодо забруднення атмосфери за наступну добу. Із залишившихся 91 випадків справилися прогнози у 61 випадку, відсоток справджуваності за літній і зимовий періоди 2016 – 2017 рр. склав 67 %.

4. ВИСНОВКИ

В результаті виконаного дослідження можна зробити такі висновки стосовно ефективності використання обох прогностичних схем:

1. Прогноз забруднення атмосферного повітря NO_2 у зимовий період 2016 – 2017 рр. за методом УкрНДГМІ показав, що динаміка зміни фактичних значень показника Q співпадає з його прогностичними значеннями. У літній період 2017 рр. фактичне значення Q майже в кожному випадку співпадало з прогностичними показниками.

2. Справджуваність прогнозу за методом УкрНДГМІ в зимовий період в середньому складала 96,6 %, у літній період – 98,3 %.

3. За МРО у зимовий і літній періоди 2016 – 2017 рр. відсоток справджуваності прогнозів склав 67 %.

4. Метод УкрНДГМІ виявився більш надійнішим, ніж МРО. Низький відсоток справджуваності в результатах прогнозу за МРО може бути пов'язаний з проблемами побудови моделі та малим розкидом класів забруднення в даній вибірці, а також зі спрямованістю методики на визначення класу забруднення, а не рівня забруднення.

5. Недоліком використання методу УкрНДГМІ є неможливість його використання в осінній та весняний періоди. Також даний метод був розроблений для м. Одеси з урахуванням фізико-географічних та метеорологічних особливостей міста, тому можливо, що використання даного методу є недоцільним для інших міст або територій.

Так, прогнозування забруднення атмосферного повітря є одним з основних способів вирішення проблем якості повітря у промислово-міських агломераціях, до яких відноситься і м. Одеса. Розробка ефективної прогностичної схеми забруднення повітряного басейну міста може дозволити превентивно реагувати на погіршення якості атмосферного повітря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2020 р. Київ, 2021. 421 с.
2. Deutscher Wetterdienst. URL: http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html (дата звернення: 06.11.2020).
3. Безуглая Э.Ю., Сонькин Л.Р. Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1971. С. 241 – 252.
4. Чугай А., Полетаева Л., Терзема В. Короткостроковый прогноз забруднення атмосферного повітря міста Одеса

діоксидом азоту. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2022. № 1. С. 88 – 93.

5. Методика краткосрочного прогноза уровня загрязнения атмосферы в г. Одессе. Киев: УкрНИГМИ, 1999.
6. Кіптенко Є. М., Козленко Т. В. Прогнозування рівнів високого забруднення атмосферного повітря у містах України. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2002. Вип. 250. URL: https://uhmi.org.ua/pub/np/250/24_Kiptenko.pdf (дата звернення: 19.02.2022).
7. Кіптенко Є. М., Козленко Т. В., Надточій Л. М. Методика короткострокового прогнозу рівнів забруднення атмосферного повітря з урахуванням метеорологічних умов для міста Маріуполь. *Часопис картографії*. 2019. № 20. С. 84 – 99. URL: http://maptimes.inf.ua/CH_20/Ch20_Article6_Prognosis-of-air-pollution-level.html (дата звернення: 19.02.2022).
8. КД 52.9.4.01–09. Методичні вказівки щодо прогнозування метеорологічних умов формування рівнів забруднення повітря в містах України. Київ: Державна гідрометеорологічна служба, 2010. 84 с.
9. Сонькин Л. Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 224 с.

REFERENCES

1. *Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini u 2020 r. (2021) [National report on the state of the environment in Ukraine in 2020]*. Kyiv. (in Ukr.)
2. *Deutscher Wetterdienst (2020)*. Available at: http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html (Accessed: 06 November 2020).
3. Bezuhlaia, E.Iu. & Sonkyn, L.R. (1971). *Meteorologicheskie aspekty zagryazneniya atmosfery [Meteorological aspects of air pollution]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
4. Chugai, A., Poletaeva, L. & Terzeman, V. (2022). *Korotkostrokovyi prohnaz zabrudnennia atmosfernoho povitria mista Odesa dioksydom azotu [Short-term forecast of air pollution in Odessa with nitrogen dioxide]*. *Problemy khimii ta staloho rozvytku [Problems of chemistry and sustainable development]*, 1, pp. 88 – 93. (in Ukr.)
5. *Metodyka kratkosrochnogo prognoza urovnya zagryazneniya atmosfery v g. Odesse [Methods of short-term forecast of the level of air pollution in Odessa]* (1999). Kiev: UkrSIHMI. (in Ukr.)
6. Kiptenko, Ye.M. & Kozlenko, T.V. (2002). *Prohnazuvannia rivniv vysokoho zabrudnennia atmosfernoho povitria u mistakh Ukrainy. [Forecasting the levels of high air pollution in the cities of Ukraine]*. *Naukovi pratsi UkrNDHMI [Scientific works of UkrSIHMI]*, 250. Available at: https://uhmi.org.ua/pub/np/250/24_Kiptenko.pdf (Accessed: 19 February 2022). (in Ukr.)
7. Kiptenko, Ye.M., Kozlenko, T.V. & Nadtochii, L.M. (2019). *Metodyka korotkostrokovoho prohnazu rivniv zabrudnennia atmosfernoho povitria z urakhuvanniam meteorologichnykh umov dlia mista Mariupol [Methods of short-term forecast of air pollution levels taking into account meteorological conditions for the city of Mariupol]*. *Chasopys kartohrafii [Journal of Cartography]*, 20, pp. 84 – 99. Available at: http://maptimes.inf.ua/CH_20/Ch20_Article6_Prognosis-of-air-pollution-level.html (Accessed: 19 February 2022). (in Ukr.)
8. *KD 52.9.4.01–09. Metodychni vkazivky shchodo prohnazuvannia meteorologichnykh umov formuvannia*

rivniv zabrudnennia povitria v mistakh Ukrainy. (2010). [GD 52.9.4.01-09. Guidelines for forecasting meteorological conditions for the formation of air pollution levels in the cities of Ukraine]. Kyiv. (in Ukr.).

9. Sonkyn, L.R. (1991). *Sinoptiko-statisticheskiy analiz i*

kratkosrochnyy prognos zagryazneniya atmosfery [Synoptic-statistical analysis and short-term forecast of atmospheric pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)

FORECASTING THE ATMOSPHERIC AIR POLLUTION CAUSED BY NITROGEN DIOXIDE IN THE CITY OF ODESA

A. V. Chugai, V. V. Terzeman

Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, avchugai@ukr.net
<http://orcid.org/0000-0002-8091-8430>

In most of Ukrainian large cities with a high concentration of population the air quality often does not meet the requirements. The air quality is also a critical component for Odesa, a recreational and resort center of Ukraine. Moreover, Odesa is a city with a million inhabitants and a large number of vehicles, freight traffic resulting from the presence of the seaport. And nitrogen dioxide is one of the main pollutants. It is emitted to the air basin mainly by motor vehicles.

The paper presents the results of testing the certain methods of short-term forecasting of the atmospheric air nitrogen dioxide-related pollution level in Odesa. The study is based on the data taken from the materials of the National Report on the State of the Environment in Ukraine and the observations of air pollution using the network of stationary observation points.

The obtained results of the forecast for the winter period using the UkrSIHMI's method indicated that the dynamics of changes in the actual values of the indicator Q coincides with the prognostic values of such indicator. In summer the actual value of Q in almost all cases coincides with the prognostic indicators. The accuracy of the forecast according to the UkrSIHMI's method for the winter period averaged 96.6 %, and for the summer period – 98.3 %. According to the method of pattern recognition for the winter and summer periods the percentage of accuracy of predictions was only 67 %.

The UkrSIHMI's method proved to be more reliable than the method of pattern recognition. The low percentage of reliability of the forecasting results obtained via the method of pattern recognition may be due to modeling problems and small variance of pollution classes in the studied sample, as well as to the focus of the methodology on determining a pollution class rather than a level of pollution. The disadvantage of using the UkrSIHMI's method is the impossibility of using it in autumn and spring.

Forecasting the air pollution is one of the main ways to solve air quality problems in both industrial and urban agglomerations. Development of an effective prognostic scheme for forecasting the air pollution in our city can prevent further air quality deterioration.

Key words: pollution forecast, integral indicator, authenticity.

Подання до редакції : 21. 06. 2022
Надходження остаточної версії : 29. 06. 2022
Публікація статті : 07. 07. 2022

Видання зареєстровано в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Реєстраційне свідоцтво серія **КВ 23515-13355ПР** від 25.07.2018

The state registration of print media is **КВ 23515-13355ПР**, originating date is 25.07.2018

Рекомендовано до друку вченою радою Одеського державного екологічного університету, протокол № 7, 07. 07. 2022 р.

Recommendations from Science Council of Odessa State Environmental University, Protocol no.7, 07. 07. 2022

Адреса редакційної колегії:

65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15,
Одеський державний екологічний університет,
тел.: (0482)-32-67-58
redactor@odeku.edu.ua

Editorial board address:

65016, Odesa, 15 Lvivska st.
Odessa State Environmental University
tel.: (0482)-32-67-58
redactor@odeku.edu.ua

Видавець і виготовлювач

Одеський державний екологічний університет
вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016
тел./факс: (0482) 32-67-35
E-mail: info@odeku.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 5242 від 08.11.2016

ISSN 2311-0902 (print). Український гідрометеорологічний журнал. 2022. № 29. 1 – 101.

ISSN 2616-7271 (online). Ukraïns'kij gidrometeorologičnij žurnal. 2022. № 29. 1 – 101.
Український гідрометеорологічний журнал
Ukrainian Hydrometeorological Journal