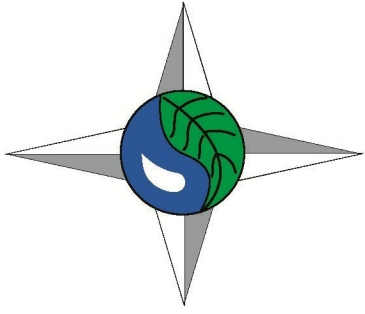


ISSN 2311-0902 (print)
ISSN 2616-7271 (online)



Номер 26
Issue 26

2020

**УКРАЇНСЬКИЙ
ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ
ЖУРНАЛ**

Ukrainian Hydrometeorological Journal

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Ministry of Education and Science of Ukraine

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Odessa State Environmental University

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

Ukrains'kij Gidrometeorologičnij Žurnal

Ukrainian Hydrometeorological journal

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Scientific Journal

Друкується 2 рази на рік

Issued: 2 times a year

Заснований у 2005 р.

Founded in 2005 y.

№ 26, 2020

Одеса

Одеський державний екологічний університет

2020

Головний редактор

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

Заступники головного редактора

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

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

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

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; **С. С. Зілітінкевич**, д-р фіз.-мат. наук, проф.
метеорології, геофізики, директор з досліджень, відділ наук про
атмосферу, університет Гельсінкі; дослідницький проф., Фінський
метеорологічний інститут (Фінляндія); **М. І. Кульбіда**, канд. геогр.
наук, директор Українського гідрометеорологічного центру,
м. Київ; **О. Макарінський**, PhD в географії, пров. наук. співроб.,
Австралійський інститут морських наук, дослідницький центр
"Арафура-Тімор" (Австралія); **Д. Макарінська**, PhD у геофізиці,
Служба якості води/ Відділ водних ресурсів, Департамент екології
та природних ресурсів (Австралія); **В. А. Овчарук**, д-р геогр. наук,
доцент, директор Гідрометеорологічного інституту ОДЕКУ;
А. М. Польовий, д-р геогр. наук, проф., зав. кафедри
агриметеорології та агроекології ОДЕКУ; **С. М. Степаненко**, д-р
фіз.-мат. наук, проф., ректор ОДЕКУ; **Ж. Р. Шакірзанова**, д-р
геогр. наук, проф., зав. кафедри гідрології суші 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; агриметеорологія; гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія; океанологія) та "Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів" Наук про Землю 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 спеціальністю Науки про Землю.

Ukrainian Hydrometeorological Journal publishes the original results of fundamental and applied research in the fields of 'Hydrometeorology' (Meteorology and Climatology; Agricultural Meteorology; Hydrology and Water Resources, Hydrochemistry; Oceanography) and 'Constructive Geography and Rational Use of Natural Resources' in the Earth Sciences. The objective of this Journal is to distribute information on modern scientific achievements of Ukrainian and foreign researchers, promote development of higher education, and publish original research works on theoretical and applied aspects of finding solution to the topical problems in both the subject and the related fields of science.

The Journal is intended to be used by lecturers of higher education institutions, students, postgraduate students, researchers and experts in the field of Natural Sciences under the speciality of Earth Sciences.

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 section : Constructive Geography
and Rational Use of Natural Resources

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; **Vasyl V. Grebin**, D. Sc. in Geography, Prof. of the
Department of Hydrology and Hydroecology of Taras Shevchenko
National University of Kyiv, Ukraine; **Mykola I. Kulbida**, PhD in
Geography, Director of Ukrainian Hydrometeorological Centre, Kyiv,
Ukraine; **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; **Valeriya A. Ovcharuk**, D. Sc. in Geography,
Assoc. Prof., Director of the Hydrometeorological Institute of OSENU,
Ukraine; **Anatolii M. Polovyi**, D. Sc. in Geography, Prof., Head of the
Department of Agrometeorology and Agroecology of OSENU, Ukraine;
Zhanetta R. Shakhirzanova, D. Sc. in Geography, Prof., Head of the
Department of Land Hydrology of OSENU, Ukraine; **Sergiy M. Stepanenko**, D. Sc. in Physics and Mathematics, Prof.,
Rector of OSENU, Ukraine; **Sergej S. Zilitinkevich**, D. Sc. in Physics
and Mathematics, Prof. of Geophysics, Meteorology; Director of
Research, Division of Atmospheric Sciences, University of Helsinki;
Research Professor, Finnish Meteorological Institute, Finland.

Executive Secretary

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



ЗМІСТ

CONTENTS

Метеорологія і кліматологія

Meteorology and Climatology

- Іванова О. В.* Адаптоване до Північно-Західного Причорномор'я мезомасштабне чисельне моделювання граничного шару атмосфери. Частина 2. Скінченнорізницева розв'язання та адаптація до реальних фізико-географічних умов місцевості **5**
- Іванова E. V.* Mesoscale numerical modeling of the boundary layer of the atmosphere adapted to the Northwestern Black Sea region. Part 2. Finite-difference solution and adaptation to real physical and geographical conditions of the area
- Коман М. М.* Визначення напрямку та швидкості вітру за супутниковими зображеннями для території України **24**
- Koman M. M.* Identification of wind direction and speed using the satellite images for the territory of Ukraine
- Серга Е. М., Хохлов В. М., Недострелова Л. В.* Сучасна динаміка показників основних кліматичних характеристик на станціях Північно-Західного Причорномор'я **37**
- Serga E. N., Khokhlov V. M., Nedostrelova L. V.* Modern dynamics in main climate characteristics at sites of North-Western Black Sea coast
- Семергей-Чумаченко А. Б., Слободяник К. Л.* Просторово-часовий розподіл сильних опадів над Україною протягом 1979-2019 років за даними реаналізу ERA5 **50**
- Semerhei-Chumachenko A. B., Slobodianyuk K. L.* Spatial-temporal distribution of heavy precipitation over Ukraine during 1979-2019 according to the ERA5 reanalysis
- Хохлов В. М., Боровська Г. О., Замфірова М. С.* Кліматичні зміни та їх вплив на режим температури повітря і опадів в Україні у перехідні сезони **60**
- Khokhlov V. M., Borovska H. O., Zamfirova M. S.* Climatic changes and their influence on air temperature and precipitation in Ukraine during transitional seasons

Агрометеорологія

Agriculture Meteorology

- Кирнасівська Н. В., Шулякова І. Г.* Агрокліматична оцінка клімату ґрунтів Північного Причорномор'я на прикладі кукурудзи **68**
- Kirnasovskaya N. V., Shulyakova I. G.* Agroclimatic assessment of soil climate of the Northern Black Sea coast region (using the example of corn)
- Кривошеїн О. О., Кривобок О. А., Адаменко Т. І.* Система визначення площ посівів основних сільськогосподарських культур України за супутниковими даними **78**
- Kryvoshein O. O., Kryvobok O. A., Adamenko T. I.* Satellite-based system of area estimation for main agricultural crops of Ukraine

**Гідрологія суші,
водні ресурси, гідрохімія**

Лобода Н. С., Катинська І. В., Смалій О. В. 91
Оцінка рівня забруднення та екологічного стану
вод річок басейну Сіверського Дінця за
показником БСК5

*Шакірзанова Ж. Р., Кічук Н. С., Романова Є. О.,
Кічук І. Д., Медведєва Ю. С.* 102
Дослідження окремих складових гідрологічного та гідрохімічного
режимів річки Дунай на українській ділянці
Рені-Ізмаїл

Океанологія

Кушнір Д. В., Тучковенко Ю. С. 116
Моделювання мінливості гідрологічних характеристик
водойми Сасик за різних варіантів її функці-
онування

**Hydrology, Water Resources,
Hydrochemistry**

Loboda N. S., Katynska I. V., Smalii O. V. 91
Assessment of the water pollution level and the
environmental status of rivers in the Siverskyi
Donets basin by BOD5

*Shakirzanova Zh. R., Kichuk N. S., Roma-
nova Ye. O., Kichuk I. D., Medvedieva Iu. S.* 102
Research of individual components of hydrologi-
cal and hydrochemical regimes of the Danube
River within the Ukrainian interval from Reni to
Izmail

Oceanography

Kushnir D. V., Tuchkovenko Yu. S. 116
Modelling the variability of hydrological parameters of the
Sasyk reservoir impoundment under various
options of its operation

УДК: 551.510:

**АДАПТОВАНЕ ДО ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я МЕЗОМАСШТАБНЕ
ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГРАНИЧНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ.
ЧАСТИНА 2. СКІНЧЕННОРІЗНИЦЕВЕ РОЗВ'ЯЗАННЯ ТА АДАПТАЦІЯ ДО РЕАЛЬНИХ
ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНИХ УМОВ МІСЦЕВОСТІ**

О. В. Іванова

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

У статті наводиться опис скінченнорізницевого розв'язання системи диференціальних рівнянь гідротермодинаміки граничного шару атмосфери, адаптованої до Північно-Західного Причорномор'я. Надається описання послідовності проведених розрахунків, схематично зображеної на блок-схемі. Адаптація використаної математичної моделі проводилась у п'ятьох аспектах: геоморфологія узбережжя (форма берегової лінії), геоморфологія суходолу (реальний рельєф території), теплофізичні характеристики ґрунту (щільність, питома вага, пористість, коефіцієнт теплопровідності), шорсткість (параметр шорсткості) та оптичні характеристики (альbedo) підстильної поверхні. Форма берегової лінії описувалася через врахування частки води у поточній комірці просторової сітки. Якщо така частка складала величину, більшу 50 %, то вважалось, що в цій комірці присутня суша, та навпаки. Матриця рельєфу формувалася зняттям значень висот у кожній точці розрахункової області з офіційних електронних карт висот. Теплофізичні характеристики ґрунту задавалися в залежності від типу ґрунту, який спостерігався в поточній розрахунковій точці. Для врахування шорсткості підстильної поверхні використовувався метод подвійного врахування елементів шорсткості у вегетаційний та невегетаційний періоди року. Останній полягає в тому, що в залежності від сільськогосподарського районування та його предметного наповнення визначалось деяке фонове середньозважене значення висоти ансамблю елементів шорсткості, яке потім через коефіцієнт пропорційності перетворювалось в параметр шорсткості. При цьому коефіцієнт пропорційності прив'язаний до виду реального елемента шорсткості у конкретній точці. Таким чином, була отримана комплексна оцінка шорсткості розглядуваної території. Альbedo підстильної поверхні приймалось різним у три періоди року: вегетаційний період року (квітень-вересень), після вегетаційний -- до зими та перший місяць весни (жовтень-листопад, березень) і зимовий період року (грудень-лютий). При цьому враховується також характер зовнішнього покриття підстильної поверхні на предмет оптичних властивостей.

Ключові слова: тривимірний модель; граничний шар атмосфери; скінченнорізницевий аналог; турбулентність; берегова лінія; рельєф; теплофізичні характеристики ґрунту; шорсткість підстильної поверхні; альbedo.

1. ВСТУП

Останнім часом при використанні сучасних математичних моделей, реалізованих на базі тієї чи іншої мови програмування і додаткових бібліотек для роботи з вхідними і вихідними даними, для користувача внутрішні блоки виявляються або закритими, або із-за складності внутрішньої структури малодоступними та малозрозумілими, що позбавляє останнього будь-яким чином повторити реалізацію чисельного розв'язку використаної постановки задачі або якимось чином вплинути на прийняту схему розрахунків без негативних наслідків для кінцевих результатів, фізично збагатити постановку

задачі та застосовувати різні підходи до опису турбулентних процесів граничного шару атмосфери (ГША), гармонійно впроваджуючи їх у скінченнорізницеві аналоги рівнянь гідротермодинаміки. Безпосередня робота з програмними блоками використаної моделі дозволяє більш глибоко оцінити роботу сукупності складових, що формують внутрішню структуру граничного шару атмосфери і знайти той варіант, який підходить саме для обраної території. Крім того, це дозволяє більш органічно адаптувати модельну постановку задачі до реально існуючих характеристик компонентів природного середовища області розрахунку.

Питаннями моделювання ГША над північно-західним причорноморським регіоном займалися свого часу автори [1-6]. Але в останніх розглядалися здебільшого варіанти стаціонарних моделей або моделей на встановлення, коли задавався досить малий часовий крок (1 сек або 60 сек), а адаптація до реальних фізико-географічних умов місцевості здійснювалася лише через кліматичні дані.

Метою цієї роботи є розкриття основних закономірностей чисельного розв'язку системи рівнянь мезомасштабної нестационарної бароклінної математичної моделі атмосфери та отримання детальних горизонтальних просторових полів геоморфологічних, теплофізичних, динамічних та оптичних властивостей підстильної поверхні області розрахунку для побудови найближчої до реальних умов бази вхідних у модель інваріантних параметрів.

2. ОПИСАННЯ ОБ'ЄКТА ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Методи реалізації системи рівнянь гідротермодинаміки граничного шару атмосфери

Для розв'язання системи рівнянь (1-6, см. [7]) з умовами (51-64, см. [7]) використовувався метод розщеплення за фізичними процесами [8]. Відзначимо, що його реалізація для завдань граничного шару містить в собі чотири етапи: перенесення, динамічне узгодження, турбулентний обмін і фазові перетворення. Турбулентний обмін може бути об'єднаний з етапом перенесення або адаптації.

Спеціальне дослідження [8], присвячене оцінці помилок апроксимації через спосіб включення турбулентного обміну, показало, що помилки визначення складових швидкості вітру можуть бути того ж порядку величини, що і самі швидкості. Ці помилки можуть бути значно зменшені із застосуванням двоциклічних схем розщеплення. Оскільки це питання побудови алгоритму детально описані в іншому місці [8, 9] тут будуть розглянуті лише деякі особливості чисельної реалізації методу розщеплення для даної задачі граничного шару.

Основні етапи розщеплення за фізичними процесами в диференціальному вигляді наступні [9].

На першому етапі розв'язуються рівняння, що описують перенесення в тривимірному просторі, а також зміни метеорологічних величин в результаті турбулентного перемішування:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3) \omega = 0, \quad (1)$$

$$\Lambda_1 \omega = \frac{\partial u \omega}{\partial x} - K_s \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}, \quad \Lambda_2 \omega = \frac{\partial v \omega}{\partial y} - K_s \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}, \quad (2)$$

$$\Lambda_3 \omega = \frac{\partial w \omega}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} K_z^\omega \frac{\partial \omega}{\partial z}, \quad (3)$$

де t - час; x, y, z - координати в декартовій системі координат; $\omega = (u, v, \vartheta, q)$; u, v, w - складові модуля вектору вітру; ϑ - відхилення потенціальної температури повітря від температури в стандартній атмосфері; q - масова частка водяної пари; K_s - горизонтальний коефіцієнт турбулентної в'язкості; K_z^ω - вертикальний коефіцієнт турбулентності.

На другому етапі розв'язується система з трьох лінійних рівнянь, що описують зміни метеорологічних величин під впливом нахилів рельєфу:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha_x \lambda \vartheta, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = \alpha_y \lambda \vartheta, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = -S(\alpha_x u + \alpha_y v), \quad (4)$$

де α_x, α_y - кути нахилу рельєфу у напрямку x - та y -координатних осей; $\lambda = g/\bar{\theta}$ - параметр плавучості; g - прискорення вільного падіння; $\bar{\theta}$ - середня за шаром потенціальна температура; $S = -\partial \theta / \partial z$ - вертикальний градієнт потенціальної температури у вільній атмосфері (береться з глобальної моделі атмосфери або знімається зі стандартних карт баричної топографії).

На третьому етапі вирішуються рівняння адаптації отриманих полів складових модуля швидкості вітру, відхилень потенціальної температури від температури в стандартній атмосфері з полем тиску:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial \pi'}{\partial x} + F_\kappa v, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial \pi'}{\partial y} - F_\kappa u, \quad \frac{\partial \pi'}{\partial z} = \lambda \vartheta,$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = -S w, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

де $\pi' = RT_R p' / p_R$ - аналог відхилення тиску від тиску в стандартній атмосфері p_R ; R - універсальна газова стала; T_R - температура в стандартній атмосфері; p' - відхилення атмосферного тиску від тиску в стандартній атмосфері; F_κ - параметр Коріоліса.

Задаються крайові умови (51-64, див. [7]). По вертикалі і на бічних межах для горизонтальних градієнтів аналога відхилення тиску π' задаються наступні співвідношення:

$$x = 0, X : \quad \frac{\partial \pi'}{\partial x} = \frac{\partial \pi'_H}{\partial x} - \lambda \int_z^H \frac{\partial \vartheta}{\partial x} dz, \quad (6)$$

$$y = 0, Y : \quad \frac{\partial \pi'}{\partial y} = \frac{\partial \pi'_H}{\partial y} - \lambda \int_z^H \frac{\partial \vartheta}{\partial y} dz, \quad (7)$$

де H – висота граничного шару.

2.2 Описання сіткового базису для побудови коректних скінченнорізницевоїх схем

Для забезпечення узгодженості і точності використаних апроксимацій похідних в скінченнорізницевоїх схемах, збіжності і стійкості розв'язків скінченнорізницевоїх рівнянь, збереження інтегральних властивостей прогностичних моделей, точності відтворення метеорологічних полів в описуваній моделі застосовувалася просторово-часова сітка спеціальної структури, на якій різні метеорологічні величини розміщуються в різних точках сітки і таке розміщення не залежить від часу. Така сітка являє собою сітку типу «С» Аракави, що є сіткою, розхитаною за простором [10] (рис. 1). Зокрема, використання саме такого типу сітки виправдано економічністю розрахунків, яка зумовлена тим, що розрахунок прогностичних величин на кожному часовому рівні передбачається не у всіх точках просторово-часової сітки. Крім того, наприклад, при використанні схеми центральних різниць розв'язок в одних і тих же вузлах здійснюється через крок за часом. Важливо також те, що в тих точках розхитаних сіток, де значення залежних змінних не визначаються, останні розраховуються за допомогою стандартних операторів згладжування, які фільтрують дрібномасштабні збурення.

Крім вищевикладеного, практична значимість введення такого типу сітки полягає в тому, що при реалізації методу розщеплення по процесам в ході використання прямого і зворотного прогонів для вирішення рівнянь, що містять в'язкі турбулентні члени, необхідні значення метеорологічних величин і в проміжних вузлах сітки.

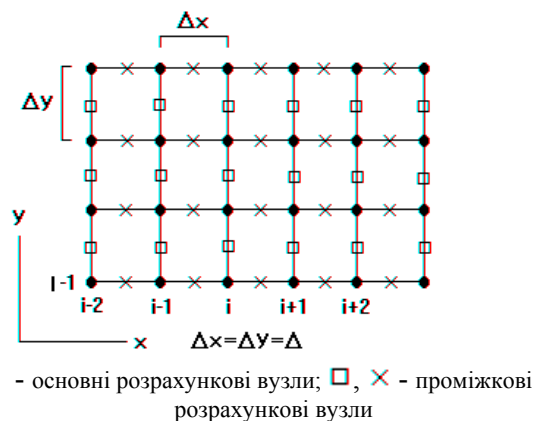


Рис. 1 -- Схема розташування вузлів сітки по горизонталі
Fig. 1 - Horizontal layout of grid nodes

По вертикалі також використовуються дробові кроки, в яких розраховуються значення коефіцієнтів турбулентності для модуля швидкості вітру і температури повітря й вертикальна складова модуля швидкості руху повітряної маси (рис. 2).

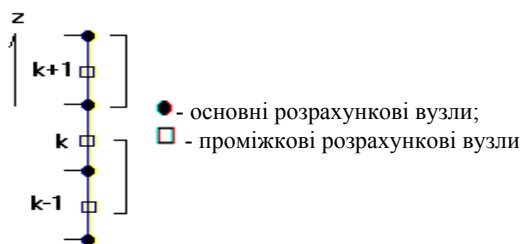


Рис. 2 -- Схема розміщення вузлів сітки по вертикалі
Fig. 2 - Vertical layout of grid nodes

Просторові похідні апроксимувалися центральними різницями, що забезпечує другий порядок точності [10], оскільки трункційна помилка включає в себе мінімальний ступінь прирощення по простору, рівний двом. Часові похідні апроксимувалися за неявною схемою Кранка-Ніколсона (схема трапецій) [11], яка є нейтральною і абсолютно стійкою при будь-яких кроках за часом і простором. Іншими словами, не накладає жорстких обмежень на величину просторово-часових кроків і при цьому зберігає обчислювальну стійкість і збіжність скінченнорізницевої аналога до його точного диференціального розв'язку.

Як було сказано вище, розв'язання всієї системи рівнянь розбивається або розщеплюється за фізичними процесами на декілька етапів (1)-(3), (4), (5). Розглянемо детально розв'язання скінченнорізницевої задачі для кожного з цих етапів.

2.3 Розв'язання скінченнорізницевих аналогів диференціальних рівнянь

2.3.1 Розв'язання скінченнорізницевої задачі впорядкованого та турбулентного переносів

Слід зазначити, що рішення скінченнорізницевої задачі просторового переносу проводиться окремо для зонального і меридіонального руху повітряних мас [9].

Скінченнорізницеvim аналогом диференційованої метеорологічної величини $f(t, x, y, z)$ є відповідні сіткові функції $u_{i,j,k}^s, v_{i,j,k}^s, \theta_{i,j,k}^s, q_{i,j,k}^s, \pi_{i,j,k}^s$, що залежить від часу ($t^s = s\Delta t$, де s - номер шару за часом) і просторових координат ($x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, z_k = k\Delta z$, де i, j, k - номери вузлів у координатних напрямках), областю визначення якої є різницєва сітка, описана в п.2.2.

Інтегрування за часом за допомогою схеми Кранка-Ніколсона полягає в тому, що між двома часовими шарами знаходиться середнє значення шуканої величини ($\zeta_{\{n\}}/2, \{n\} = \{i, j, k\}$), щодо якої проводяться подальші розрахунки:

$$\frac{\zeta_{\{n\}}}{2} = \frac{f_{\{n\}}^{s+1} + f_{\{n\}}^s}{2} = f_{\{n\}}^{s+1/2}. \quad (8)$$

З врахуванням (8) часова похідна приймає вигляд:

$$\frac{f_{\{n\}}^{s+1} - f_{\{n\}}^s}{\Delta t} = \frac{\zeta_{\{n\}} - f_{\{n\}}^s - f_{\{n\}}^s}{\Delta t} = \frac{\zeta_{\{n\}} - 2f_{\{n\}}^s}{\Delta t}. \quad (9)$$

Для горизонтального адвективного і турбулентного перенесення права частина виразу (2), яка апроксимується схемою центральних різниць, матиме вигляд:

$$\frac{\frac{\{V_{\{i,j\}+1/2}\}}{2} \zeta_{\{i,j\}+1} - \frac{\{V_{\{i,j\}-1/2}\}}{2} \zeta_{\{i,j\}-1}}{2\Delta\{x,y\}} - \frac{\frac{K_s^f}{2} (\zeta_{\{i,j\}+1} - \zeta_{\{i,j\}}) - \frac{K_s^f}{2} (\zeta_{\{i,j\}} - \zeta_{\{i,j\}-1})}{\Delta\{x,y\}^2}, \quad (10)$$

а для вертикального впорядкованого і турбулентного переносів для правої частини виразу (3) отримаємо наступне:

$$\frac{\frac{w_{k+1/2}}{2} \zeta_{k+1} - \frac{w_{k-1/2}}{2} \zeta_{k-1}}{2\Delta z} - \frac{\frac{K_{zk+1/2}^f}{2} (\zeta_{k+1} - \zeta_k) - \frac{K_{zk-1/2}^f}{2} (\zeta_k - \zeta_{k-1})}{\Delta z^2}, \quad (11)$$

де $\{V\} = \{u, v\}$ - одна зі складових модуля швидкості вітру; $V_{\{i,j\}\pm 1/2}, K_{zk\pm 1/2}^f$ - складові вектору швидкості вітру і вертикального коефіцієнта турбулентності на проміжних сіткових точках як середнє арифметичне між значеннями цієї величини на сусідніх вертикальних рівнях. Горизонтальні складові модуля швидкості вітру в останніх точках розраховувалися за допомогою косинус-розкладання в ряд Фур'є; а вертикальна складова за допомогою рівняння нерозривності, задіюючи складові вектору швидкості вітру на проміжних вузлах сітки.

В результаті диференціальні рівняння (2) і (3) можуть бути представлені наступними скінченнорізницеvim аналогами з відомою похибкою:

- для горизонтального переносу

$$\frac{\zeta_{\{i,j\}} - 2f_{\{i,j\}}^s}{\Delta t} = \frac{\frac{\{V_{\{i,j\}+1/2}\}}{2} \zeta_{\{i,j\}+1} - \frac{\{V_{\{i,j\}-1/2}\}}{2} \zeta_{\{i,j\}-1}}{2\Delta\{x,y\}} + \frac{\frac{K_s^f}{2} (\zeta_{\{i,j\}+1} - \zeta_{\{i,j\}}) - \frac{K_s^f}{2} (\zeta_{\{i,j\}} - \zeta_{\{i,j\}-1})}{\Delta\{x,y\}^2}; \quad (12)$$

- для вертикального переносу

$$\frac{\zeta_k - 2f_k^s}{\Delta t} = \frac{\frac{w_{k+1/2}}{2} \zeta_{k+1} - \frac{w_{k-1/2}}{2} \zeta_{k-1}}{2\Delta z} + \frac{\frac{K_{zk+1/2}^f}{2} (\zeta_{k+1} - \zeta_k) - \frac{K_{zk-1/2}^f}{2} (\zeta_k - \zeta_{k-1})}{\Delta z^2} - [\text{countgrad}] + [\text{rad}]. \quad (13)$$

Для врахування протиградієнтного перенесення у всіх рівняннях, а також потоків короткохвильової і довгохвильової радіації в рівнянні припливу тепла автор увів додаткові члени

$$\left[\text{countgrad} = K_{zk+1/2}^f \frac{(\gamma_{k+1}^f + \gamma_k^f)}{2\Delta z} - K_{zk-1/2}^f \frac{(\gamma_k^f + \gamma_{k-1}^f)}{2\Delta z} \right]$$

та $[\text{rad} = Q_R]$, перший з яких забезпечує додат-

ній потік тепла при нейтральній або слабко стійкій стратифікаціях, а другий виступає як постійне джерело тепла. Тут γ^f - протиградієнт метеорологічної величини [7]. Після зведення загальних членів рівнянь (12) і (13) можна записати у вигляді рекурентного співвідношення:

$$P_{\{n\}} \zeta_{\{n+1\}} - Q_{\{n\}} \zeta_{\{n\}} + R_{\{n\}} \zeta_{\{n-1\}} = -G_{\{n\}}, \quad (14)$$

де для вертикального переносу

$$\begin{aligned} P_{\{k\}} &= a_1 K_{zk+1/2}^f + a_2 w_{k+1/2}; \\ Q_{\{k\}} &= 1/2 + a_1 (K_{zk+1/2}^f + K_{zk-1/2}^f); \\ R_{\{k\}} &= a_1 K_{zk-1/2}^f + a_2 w_{k-1/2}; \quad G_{\{k\}} = \omega_k^j; \\ a_1 &= \frac{\Delta t}{4\Delta z^2}; \quad a_2 = \frac{\Delta t}{8\Delta z}, \end{aligned}$$

а для горизонтального --

$$\begin{aligned} P_{\{i,j\}} &= a_1 + a_2 \{u, v\}_{\{i,j\}+1/2}; \quad Q_{\{i,j\}} = 1/2 + 2a_1; \\ R_{\{i,j\}} &= a_1 + a_2 \{u, v\}_{\{i,j\}-1/2}; \\ G_{\{i,j\}} &= \omega_k^j - a_2 [K_{zk+1/2}^f (\gamma_{k+1} + \gamma_k) - K_{zk-1/2}^f (\gamma_k + \gamma_{k-1})] + \\ &+ a_2 (4Q_R); \\ a_1 &= \frac{\mu \Delta t}{4\Delta \{x, y\}^2}; \quad a_2 = \frac{\Delta t}{8\Delta \{x, y\}}. \end{aligned}$$

Для вирішення рекурентного співвідношення (14) використовуються методи прямого прогону для визначення прогнотичних коефіцієнтів $(P_{\{n\}}, Q_{\{n\}}, R_{\{n\}}, G_{\{n\}})$ і зворотнього - для визначення шуканих метеорологічних величин:

$$f_{\{n\}}^{s+1} = \zeta_{\{n\}} - f_{\{n\}}^j,$$

$$\text{де, } \zeta_{\{n\}} = \alpha_{\{n\}} \zeta_{\{n+1\}} + \beta_{\{n\}}, \quad \alpha_{\{n\}} = \frac{P_{\{n\}}}{Q_{\{n\}} - \alpha_{\{n-1\}} R_{\{n\}}},$$

$$\beta_{\{n\}} = \frac{G_{\{n\}} + R_{\{n\}} \beta_{\{n-1\}}}{Q_{\{n\}} - \alpha_{\{n-1\}} R_{\{n\}}}.$$

У випадку меридіального перенесення при $i=1, j=1..20, k=1..50$:

$$\alpha_{\{i-1\}} = 1; \quad \beta_{u\{i-1\}} = 0;$$

$$\beta_{v\{i-1\}} = -2\Delta \{x, y\} \frac{v_{i+1,j,k} - v_{i,j,k}}{\Delta \{x, y\}}, \quad \text{якщо } u_{i,j,k} < 0;$$

$$\beta_{v\{i-1\}} = 0, \quad \text{якщо } u_{i,j,k} \geq 0;$$

$$\beta_{g\{i-1\}} = 0; \quad \beta_{q\{i-1\}} = 0.$$

Останні крайові умови справедливо задати тільки при $i=1$, оскільки для визначення коефіцієнтів α та β застосовується прямий прогон.

При $i=20, j=1..20, k=1..50$:

$$\zeta_{ui+1,j,k} = \frac{\beta_{ui}}{1 - \alpha_i};$$

$$\zeta_{vi+1,j,k} = \frac{\beta_{vi} - \left(-2\Delta \{x\} \frac{v_{i,j,k} - v_{i-1,k,j}}{\Delta \{x\}} \right)}{1 - \alpha_i}, \quad \text{якщо}$$

$$u_{i,j,k} > 0; \quad \zeta_{vi+1,j,k} = \frac{\beta_{vi}}{1 - \alpha_i}, \quad \text{якщо } u_{i,j,k} \leq 0;$$

$$\zeta_{gi+1,j,k} = \frac{\beta_{gi}}{1 - \alpha_i}; \quad \zeta_{qi+1,j,k} = \frac{\beta_{qi}}{1 - \alpha_i}.$$

Оскільки для визначення значень ζ застосовується обернений прогон, тому останні крайові умови досить задати тільки при $i=20$.

У випадку зонального перенесення при $i=1..20, j=1, k=1..50$:

$$\alpha_{\{j-1\}} = 1; \quad \beta_{v\{j-1\}} = 0;$$

$$\beta_{u\{j-1\}} = -2\Delta \{y\} \frac{u_{i,j+1,k} - u_{i,j,k}}{\Delta \{y\}}, \quad \text{якщо } v_{i,j,k} < 0;$$

$$\beta_{u\{j-1\}} = 0, \quad \text{якщо } v_{i,j,k} \geq 0;$$

$$\beta_{g\{j-1\}} = 0; \quad \beta_{q\{j-1\}} = 0.$$

Останні крайові умови справедливо задати тільки при $j=1$, оскільки для визначення коефіцієнтів α та β застосовується прямий прогон.

При $i=1..20, j=20, k=1..50$:

$$\zeta_{vi,j+1,k} = \frac{\beta_{vj}}{1 - \alpha_j};$$

$$\zeta_{ui,j+1,k} = \frac{\beta_{vj} - \left(-2\Delta \{y\} \frac{u_{i,j,k} - u_{i,j-1,k}}{\Delta \{y\}} \right)}{1 - \alpha_j}, \quad \text{якщо}$$

$$v_{i,j,k} > 0; \quad \zeta_{ui,j+1,k} = \frac{\beta_{vj}}{1 - \alpha_j}, \quad \text{якщо } v_{i,j,k} \leq 0;$$

$$\zeta_{gi,j+1,k} = \frac{\beta_{gj}}{1 - \alpha_j}; \quad \zeta_{qi,j+1,k} = \frac{\beta_{qj}}{1 - \alpha_j}.$$

Оскільки для визначення значень ζ застосовується обернений прогон, тому останні крайові

умови досить задати тільки при $j = 20$.

У випадку вертикального перенесення для визначення коефіцієнтів α та β використовується обернений прогон, тому крайові значення останніх достатньо задати на рівні $k = 50$. Отже, при $i = 1..20, j = 1..20, k = 50$:

$$\alpha_{i,j,k+1} = \frac{K_{z i,j,k-1/2}^u / \Delta z + w_{i,j,k-1/2}}{\Delta z / \tau + K_{z i,j,k-1/2}^u / \Delta z};$$

$$\beta_{ui,j,k+1} = \frac{2 \left[\zeta_{ui,j,k} - \left(-K_{z i,j,k-1/2}^u \gamma_{ui,j,k} / 2 \right) \right] \Delta z / \tau}{\Delta z / \tau + K_{z i,j,k-1/2}^u / \Delta z};$$

$$\beta_{\vartheta,j,k+1} = \frac{2 \left[\zeta_{\vartheta,j,k} + S_{i,j,k} + F_{\vartheta i,j,k} - \left(-K_{z i,j,k-1/2}^T \gamma_{\vartheta i,j,k} / 2 \right) \right] \Delta z / \tau}{\Delta z / \tau + K_{z i,j,k-1/2}^T / \Delta z};$$

$$\beta_{qi,j,k+1} = \frac{2 \left[\zeta_{qi,j,k} - \left(-K_{z i,j,k-1/2}^q \gamma_{qi,j,k} / 2 \right) \right] \Delta z / \tau}{\Delta z / \tau + K_{z i,j,k-1/2}^q / \Delta z}.$$

Для визначення значень ζ застосовується прямий прогон, тому достатньо задати крайові значення на рівні $k = 1$. Отже, при $i = 1..20, j = 1..20, k = 1$:

$\zeta_{ui,j,k-1} = 0; \zeta_{vi,j,k-1} = 0$, якщо точка розрахунку знаходиться над сушею;

$\zeta_{ui,j,k-1} = 2u_{wi,j,k-1}; \zeta_{vi,j,k-1} = 2v_{wi,j,k-1}$, якщо точка розрахунку знаходиться над морем, де u_w, v_w - складові модуля швидкості дрейфової течії;

$$\zeta_{\vartheta i,j,k-1} = 2\vartheta_{0i,j}; \zeta_{qi,j,k-1} = 2q_{0i,j}.$$

Величини з індексами «0» означають приземні або приводні значення.

2.3.2 Рішення скінченно-різницевої задачі, яка описує вплив нахилів рельєфу

За часом рівняння (4) апроксимуються за схемою Кранка-Нікольсона з урахуванням введення нових змінних (8). В результаті отримуємо наступні рівняння:

$$\frac{\zeta_{u\{n\}} - 2u_{\{n\}}^s}{\Delta t} = \alpha_{x\{n\}} \lambda \frac{\zeta_{\vartheta\{n\}}}{2}, \quad (15)$$

$$\frac{\zeta_{v\{n\}} - v_{\{n\}}^s}{\Delta t} = \alpha_{y\{n\}} \lambda \frac{\zeta_{\vartheta\{n\}}}{2}, \quad (16)$$

$$\frac{\zeta_{\vartheta\{n\}} - \vartheta_{\{n\}}^s}{\Delta t} = -S \left(\alpha_{x\{n\}} \frac{\zeta_{u\{n\}}}{2} + \alpha_{y\{n\}} \frac{\zeta_{v\{n\}}}{2} \right). \quad (17)$$

Після відповідних перетворень(15)-(17) отримуємо вирази для шуканих прогностичних величин складових швидкості вітру і відхилень температури повітря:

$$u_{\{n\}}^{s+1} = \zeta_{u\{n\}} - u_{\{n\}}^s, \quad (18)$$

$$v_{\{n\}}^{s+1} = \zeta_{v\{n\}} - v_{\{n\}}^s, \quad (19)$$

$$\vartheta_{\{n\}}^{s+1} = \zeta_{\vartheta\{n\}} - \vartheta_{\{n\}}^s, \quad (20)$$

$$\text{де } \zeta_{u\{n\}} = 2u_{\{n\}}^s + \Delta t \lambda \alpha_{x\{n\}} \frac{\zeta_{\vartheta\{n\}}}{2}, \quad (21)$$

$$\zeta_{v\{n\}} = 2v_{\{n\}}^s + \Delta t \lambda \alpha_{y\{n\}} \frac{\zeta_{\vartheta\{n\}}}{2}, \quad (22)$$

$$\zeta_{\vartheta\{n\}} = \frac{2\vartheta_{\{n\}}^s - S\Delta t \left(\alpha_{x\{n\}} u_{\{n\}}^s + \alpha_{y\{n\}} v_{\{n\}}^s \right)}{1 + S\lambda \frac{\Delta t}{4} \left(\alpha_{x\{n\}}^2 + \alpha_{y\{n\}}^2 \right)}. \quad (23)$$

2.3.3 Рішення скінченно-різницевої задачі адаптації метеорологічних полів і поля тиску

Для замикання представленної системи рівнянь необхідно також визначити величину аналогу відхилення тиску π' . Для цього, використовуючи попередньо ряд рівнянь із (5), було отримане тривимірне рівняння Пуассона, яке дискретизувалося на наявній просторовій сітці з неоднорідною нелінійною крайовою задачею третього роду (6-7). При цьому застосовувалося косинус-розкладання з елементами швидкого перетворення Фур'є для складових модуля швидкості вітру, а також операція розкладання плоского оператора Лапласа за власними функціями по горизонталі. В результаті відносно до $\partial^2 \pi' / \partial z^2$ отриманий вираз привели до відомої форми рекурентного співвідношення [9]:

$$P\pi_{i_{1/2},j_{1/2},k+1}^{s+1} - Q_i \pi_{i_{1/2},j_{1/2},k}^{s+1} + R\pi_{i_{1/2},j_{1/2},k-1}^{s+1} = -G_{i_{1/2},j_{1/2},k}, \quad (24)$$

де $P = R = \frac{\Delta \{x, y\} (1 + 4f^2 \tau^2)}{S\lambda \tau \Delta z^2}$; $i_{1/2}, j_{1/2}$ - горизонтальні координати проміжних сіткових точок;

$$Q_{i,l} = \frac{2\Delta\{x,y\}(1+4F_{\kappa}^2\tau^2)}{S\lambda\tau\Delta z^2} + 16\frac{\tau}{\Delta\{x,y\}} \left\{ \sin^2 \left[\frac{P(i-1)}{2} \right] + \sin^2 \left[\frac{P(j-1)}{2} \right] \right\};$$

$$G_{i_{1/2},j_{1/2},k} = \left[\begin{aligned} & (1+4F_{\kappa}^2\tau^2) \left[\begin{aligned} & S_{ui-1/2,l,k} - S_{ui+1/2,l,k} + \\ & + S_{vi,j-1/2,k} - S_{vi,j+1/2,k} \end{aligned} \right] + \\ & + D_{ui-1/2,j,k} - D_{ui+1/2,j,k} + \\ & + D_{vi,j-1/2,k} - D_{vi,j+1/2,k} + \\ & + \frac{\Delta\{x,y\}(1+4F_{\kappa}^2\tau^2)}{S\tau\Delta z} (g_{i,j,k} - g_{i,j,k+1}) \end{aligned} \right]_{i\pm 1/2,j\pm 1/2,k}$$

$$S_{ui-1/2,j,k} = (u_{i-1,j,k} + u_{i,j,k})_{i-1/2,j,k};$$

$$S_{ui+1/2,j,k} = (u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k})_{i+1/2,j,k};$$

$$S_{vi,j-1/2,k} = (v_{i,j-1,k} + v_{i,j,k})_{i,j-1/2,k};$$

$$S_{vi,j+1/2,k} = (u_{i,j,k} + u_{i,j+1,k})_{i,j+1/2,k};$$

$$D_{ui-1/2,j,k} = \left[\begin{aligned} & (1-4F_{\kappa}^2\tau^2)(u_{i,j,k} + u_{i-1,j,k}) + \\ & + 4\tau F_{\kappa} (v_{i,j,k} + v_{i-1,j,k}) \end{aligned} \right]_{i-1/2,j,k};$$

$$D_{ui+1/2,j,k} = \left[\begin{aligned} & (1-4F_{\kappa}^2\tau^2)(u_{i+1,j,k} + u_{i,j,k}) + \\ & + 4\tau F_{\kappa} (v_{i+1,j,k} + v_{i,j,k}) \end{aligned} \right]_{i+1/2,j,k};$$

$$D_{vi,j-1/2,k} = \left[\begin{aligned} & (1-4F_{\kappa}^2\tau^2)(v_{i,j,k} + v_{i,j-1,k}) + \\ & + 4\tau F_{\kappa} (u_{i,j,k} + u_{i,j-1,k}) \end{aligned} \right]_{i,j-1/2,k};$$

$$D_{vi,j+1/2,k} = \left[\begin{aligned} & (1-4F_{\kappa}^2\tau^2)(v_{i,j+1,k} + v_{i,j,k}) + \\ & + 4\tau F_{\kappa} (u_{i,j+1,k} + u_{i,j,k}) \end{aligned} \right]_{i,j+1/2,k};$$

$$\tau = \frac{\Delta t}{4}$$

На рівні $k = 50$:

$$G_{i_{1/2},j_{1/2},k} = \left[\begin{aligned} & (1+4F_{\kappa}^2\tau^2) \left[\begin{aligned} & S_{ui-1/2,j,k} - S_{ui+1/2,j,k} + \\ & + S_{vi,j-1/2,k} - S_{vi,j+1/2,k} \end{aligned} \right] + \\ & + \frac{\Delta\{x,y\}(1+4F_{\kappa}^2\tau^2)}{\lambda S\tau\Delta z^2} \pi'_{i,j,k} \end{aligned} \right]_{i_{1/2},j_{1/2},k};$$

На рівні $k = 1$:

$$G_{i_{1/2},j_{1/2},1} = \left[\begin{aligned} & (1+4F_{\kappa}^2\tau^2) \left[\begin{aligned} & S_{ui-1/2,j,1} - S_{ui+1/2,j,1} + \\ & + S_{vi,j-1/2,1} - S_{vi,j+1/2,1} \end{aligned} \right] - \\ & - \frac{\Delta\{x,y\}(1+4F_{\kappa}^2\tau^2)}{S\tau\Delta z} g_{i,j,1} \end{aligned} \right]_{i_{1/2},j_{1/2},k};$$

Величини з індексами, які включають половинні кроки уздовж просторових координат, отримані в результаті прямого перетворення Фур'є.

Для вирішення рівняння (24) застосовуються методи оберненого прогону у вертикальному напрямку:

$$\pi'_{i+1/2,j+1/2,k}{}^{s+1} = \pi'_{i+1/2,j+1/2,k+1}{}^{s+1} \alpha_{i,j,k} + \beta_{i,j,k}, \quad (25)$$

де $k = 49..1$; $\{i, j\} = 1..20$;

$$\pi'_{i+1/2,j+1/2,50}{}^{s+1} = 0; \alpha_{i,j,k} = \frac{P}{Q_{i,j} - R\alpha_{i,j,k-1}},$$

$$\beta_{i,j,k} = \frac{G_{i_{1/2},j_{1/2},k} + R\beta_{i,j,k-1}}{Q_{i,j} - R\alpha_{i,j,k-1}} - \text{коєфіцієнти прогону,}$$

знаходяться методом прямого прогону в тому ж напрямку, що й в попередньому випадку; $\alpha_{i,j,1} = 1$; $\beta_{i,j,1} = 0$.

Скінченнорізницеві аналоги межових умов на бічних межах розрахункового паралелепіпеда мають вигляд:

- при $i = 1, j = 1..20, k = 1..49$:

$$\pi'_{i,j,k}{}^{s+1} = \pi'_{i,j,k}{}^s - \tau \left[\frac{\pi'_{i+1,j,k+1}{}^s - \pi'_{i,j,k+1}{}^s}{\Delta x} - \frac{g_{i+1,j,k+1}^s - g_{i,j,k+1}^s}{-\lambda\Delta z \Delta x} \right], \quad (26)$$

де $\pi'_{i,j,50}{}^s = -F_{\kappa}\Delta\{x,y\}(ju_g - iv_g)$;

- при $i = 20, j = 1..20, k = 1..49$:

$$\pi'_{i,j,k}{}^{s+1} = \pi'_{i,j,k}{}^s + \tau \left[\frac{\pi'_{i,j,k+1}{}^s - \pi'_{i-1,j,k+1}{}^s}{\Delta x} - \frac{g_{i,j,k+1}^s - g_{i-1,j,k+1}^s}{-\lambda\Delta z \Delta x} \right]; \quad (27)$$

- при $i = 1..20, j = 1, k = 1..49$:

$$\pi_{i,j,k}^{s+1} = \pi_{i,j,k}^{ts} - \tau \left[\frac{\pi_{i,j+1,k+1}^{ts} - \pi_{i,j,k+1}^{ts}}{\Delta x} - \frac{-\lambda \Delta z}{\Delta x} \frac{g_{i,j+1,k+1}^s - g_{i,j,k+1}^s}{\Delta x} \right]; \quad (28)$$

- при $i = 1..20, j = 20, k = 1..49$:

$$\pi_{i,j,k}^{s+1} = \pi_{i,j,k}^{ts} + \tau \left[\frac{\pi_{i,j,k+1}^{ts} - \pi_{i,j-1,k+1}^{ts}}{\Delta x} - \frac{-\lambda \Delta z}{\Delta x} \frac{g_{i,j,k+1}^s - g_{i,j-1,k+1}^s}{\Delta x} \right]. \quad (29)$$

Після застосування оберненої процедури косинус-розкладання шукана величина аналогу відхилення тиску отримується в основних вузлах сітки.

Значення відхилень потенціальної температури знаходяться за діагностичним рівнянням статички (5), перетвореного алгебраїчним способом до вигляду, при застосуванні схеми Кранка-Ніколсона:

$$g_{i,j,k}^{s+1} = \zeta_{g_{i,j,k}} - g_{i,j,k}^s, \quad (30)$$

$$\text{де } \zeta_{g_{i,j,k}} = \frac{1}{\lambda} \frac{\pi_{i,j,k+1}^{s+1} - \pi_{i,j,k}^{s+1}}{\Delta z}.$$

Складові модуля швидкості вітру отримуються через заміну перших двох рівнянь (5) скінченнорізницеvim аналогом на розхитаній за простором сітці (рис. 1) з застосуванням процедури релаксації, яка полягає у тому, що для прогностичного значення шуканої метеорологічної величини використовується лінійна комбінація поточного і діагностичного значень:

$$u_{i+1/2,j,k}^{s+1} = \frac{1}{1+4\tau^2 F_\kappa^2} \times \left[\frac{D_{i+1/2,j,k}}{\Delta\{x,y\}} - \frac{16\tau^2 F_\kappa}{\Delta\{x,y\}} \times \left(\frac{\pi_{i+1,j+2,k}^{s+1} + \pi_{i+1,j+2,k}^{s+1}}{-\pi_{i,j,k}^{s+1} - \pi_{i+1,j,k}^{s+1}} \right) - \frac{4\tau}{\Delta\{x,y\}} (\pi_{i+1,j+1,k}^{s+1} - \pi_{i,j+1,k}^{s+1}) \right]; \quad (31)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^{s+1} = \frac{1}{1+4\tau^2 F_\kappa^2} \times \left[\frac{D_{i,j+1/2,k}}{\Delta\{x,y\}} + \frac{16\tau^2 F_\kappa}{\Delta\{x,y\}} \times \left(\frac{\pi_{i+2,j,k}^{s+1} + \pi_{i+2,j+1,k}^{s+1}}{-\pi_{i,j,k}^{s+1} - \pi_{i,j+1,k}^{s+1}} \right) - \frac{4\tau}{\Delta\{x,y\}} (\pi_{i+1,j+1,k}^{s+1} - \pi_{i+1,j,k}^{s+1}) \right]. \quad (32)$$

Після застосування швидкого оберненого перетворення Фур'є складові модуля швидкості вітру отримуються в основних вузлах сітки.

2.4 Опис порядку обчислень

Весь етап обчислень розділяється на два основних підетапи [9]:

- обчислення приповерхневих параметрів;
- рішення задачі вільного граничного шару методом розщеплення.

В рамках першого підетапу визначаються:

- 1) локальний час;
- 2) метеорологічні величини на верхньому рівні приземного шару та на рівні Землі або на поверхні води;
- 3) параметри в середині шару постійних потоків;
- 4) модифіковані профілі температури, масової частки водяної пари та профілі кількості крапельної рідини, а також кількості опадів в результаті застосування процедури вологоконвективного пристосування;
- 5) 5.1) якщо розрахункова точка знаходиться над сушею, то:

- потоки коротко- та довгохвильової радіації на всіх рівнях в граничному шарі та на підстильній поверхні;
- теплофізичні характеристики ґрунту в залежності від її вологості;
- температура поверхні ґрунту як результат рішення рівняння теплового балансу ґрунту;
- профілі температури глибинних шарів ґрунту в результаті рішення рівняння теплопровідності ґрунту;
- характеристики вологості ґрунту за рівнянням водного балансу;

5.2) якщо розрахункова точка знаходиться над морем, то:

- потоки коротко- та довгохвильової радіації на всіх рівнях в граничному шарі та на поверхні води;
- додаткові потоки за рахунок бризкових хмар, які утворюються при наявності штормового вітру;
- потоки імпульсу, явного та прихованого тепла;
- вертикальні профілі швидкості руху води, температури та параметрів турбулентності, а також їх поверхневих значень;

6) поверхневі напруження вітру;

7) підготовка інформації на поверхні Землі та на верхньому рівні приземного або приводного шарів.

В рамках другого підетапу рішення задачі ві-

льного граничного шару включає в себе:

- розрахунок перенесення по вертикалі властивостей повітряної маси за допомогою одновимірною прогону для полів температури, вологості і складових швидкості вітру, а також параметрів турбулентності (позначимо цю процедуру як PROGZ);
- розрахунок перенесення уздовж вісі X (позначимо цю процедуру як TRANSX);
- розрахунок перенесення уздовж вісі Y (позначимо цю процедуру як TRANSY);
- розрахунок полів складових швидкості вітру і відхилення потенціальної температури з урахуванням рельєфу (позначимо цю процедуру як RELIEF);
- розрахунок поля тиску в результаті рішення рівняння Пуассона та подальша адаптація з полями метеорологічних величин (позначимо цю процедуру як ADAPT).

Використання вищезазначених процедур здійснюється за двоциклічною схемою розщеплення зі симетризацією (рис. 3), суть якої поля-

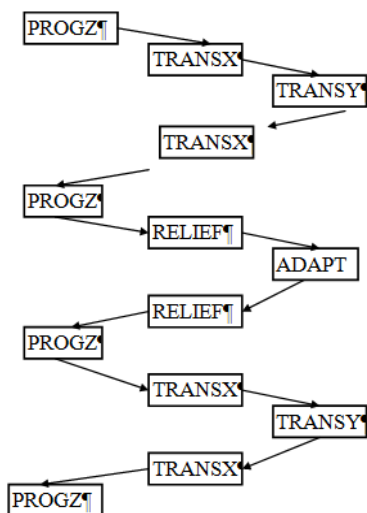


Рис. 3 -- Схема розв'язування задачі вільного граничного шару методом розщеплення
Fig. 3 - Scheme for solving the free boundary layer problem using the splitting method

гає у тому, що перед та після процедури адаптації метеорологічних полів та поля тиску, виконуються процедури турбулентного та впорядкованого переносів, а також врахування ефектів орографії, які, в свою чергу, також циклічно повторюються. Тобто, спочатку відбувається розрахунок перенесень уздовж вісей Z, X, Y, X, Z, після чого враховуються орографічні ефекти, здійснюється розрахунок поля тиску та адаптація останнього до полів метеорологічних величин. Надалі послідовність розрахунків повторюється дзеркально або симетрично, тобто: враху-

вання нахилів підстильної поверхні, перенесення уздовж вісей Z, X, Y, X, Z.

Після процедури PROGZ починається знову перший підетап розрахунків.

2.5 Умови проведення чисельного експерименту

2.5.1 Загальні відомості

Основною умовою використання квазістатичності в задачах граничного шару є умови переважання горизонтальних розмірів області розрахунку над її вертикальними розмірами. Передбачається, що співвідношення вертикального масштабу до горизонтального не повинне перевищувати декількох сотих. З іншого боку, задача про мезометеорологічний граничний шар атмосфери припускає, що процеси конвекції, включаючи багатоярусну конвекцію, що виходить за межі граничного шару, розглядатися не будуть. Конвективні процеси враховувалися параметрично через застосування процедури вологоконвективного пристосування [7], результатом якого є модифікація профілів температури та вологості, а також визначення кількості крапельної рідини та опадів. Це означає також, що використання повного третього рівняння руху не передбачається в цьому дослідженні. У протилежному випадку, область розрахунку по вертикалі не повинна була б обмежуватися декількома тисячами метрів, тобто для коректного опису вертикального переносу за рахунок конвекції необхідно було перенести верхню межу розрахунку, де відбувається згасання вертикальних рухів, на висоту тропопаузи або вище. Необхідно підкреслити, що проводиться моделювання суто граничного шару, а не вільної атмосфери до рівня конвекції.

Крім того, вихідна постановка задачі [7] не припускає розв'язання повної регіональної задачі прогнозу погоди у всій товщі тропосфери і навіть нижній стратосфері, як це здійснюється в сучасних моделях.

У зв'язку із цим була обрана область 100*100 км у північно-західній частині Чорного моря поблизу м. Одеса із центром у районі с. Вигода (Палійове) зі сталим кроком сітки 5000 м уздовж вісей x та y, тобто 20*20 вузлів, і 50 рівнів по вертикалі (50, 100, 150, 200, ..., 2500 м) зі сталим кроком по вертикалі в 50 м. Таким чином, просторова сітка – це паралелепіпед з розмірами 20x20x50 точок.

2.5.2 Визначення берегової лінії

Область розрахунку з розташуванням вузлів у горизонтальній площині (рис. 4) знаходиться в межах $46^{\circ}11'41'' - 47^{\circ}02'59''$ пн.ш. та $30^{\circ}00'21'' - 31^{\circ}15'36''$ сх.д. Вузли, охоплені в кружечки, є контрольними вузлами, які співпадають з місцем розташування станцій, де проводилися метеорологічні вимірювання, результати яких будуть порівнюватися в подальшому з результатами чисельного моделювання.

Берегова лінія формувалася зняттям з фізичної електронної географічної карти точних координат точок, що розташовуються на береговій лінії, які потім за допомогою графічного інструментарію візуалізувалися у криву відповідної форми (рис. 4, синя крива).

Для визначення належності сіткових точок до моря чи до суші, які знаходяться на межі розділу, на географічну фізичну карту необхідного масштабу була накладена модельна просторова сітка, яка розбила область розрахунку на окремі комірки. Далі здійснювалася оцінка кожної комірки на предмет відсотку води або в суші в ній. Таке зіставлення показало, що частина з них цілком належать морю, більша частина – сухо-

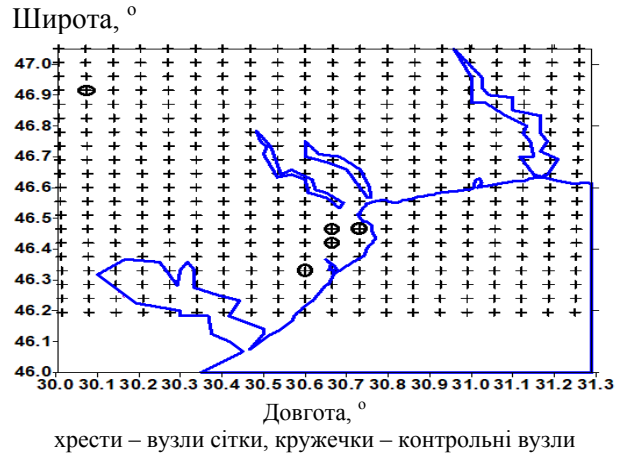


Рис. 4 -- Область розрахунку в північно-західній частині Чорного моря
 Fig. 4 - Settlement area in the north-western part of the Black Sea

долу, а деякі є межовими (табл. 1). Наприклад, число 25 означає, що в комірці 25 % займає вода, отже, 75 % -- суша. Цифри «1» та «0» означають, що в поточній комірці всю площу займають вода та суша відповідно. Для такої оцінки була використана дійсна карта північно-західної частини Чорного моря, а не груба схема берегової лінії.

Таблиця 1 - Частка води (%) від загальної площі комірки сітки області розрахунку
 Table 1 - Water percentage (%) of the total area of the grid cell of the calculation area

Номер вузла, вісь y	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	15	0	0	0	0	
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	50	5	0	0	0	
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	50	8	0	0	
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	40	15	0	0	
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	5	15	25	0	0	0	0	0	0	15	25	0	0	
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	25	25	10	0	0	0	0	35	50	0	0	
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	0	40	0	0	0	5	0	10	15	0	
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	5	20	0	0	5	30	80	1	1	90	70
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	25	50	70	97	1	1	1	1	1	1
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	6	0	0	0	15	10	0	0	0	0	0	0	0	55	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	5	0	0	10	75	1	30	40	0	0	0	0	40	97	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4	0	0	0	25	1	85	50	0	0	0	0	75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	0	0	0	15	97	1	1	60	0	0	20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	0	0	0	0	5	32	95	85	0	0	75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	0	0	0	0	0	98	55	35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
	Номер вузла, вісь x																						

«0» - суша, «1» - море; цифри жирним шрифтом – внутрішні основні вузли сітки в області розрахунку

2.5.3 Фізико-географічні умови області розрахунку та рельєф

Північно-західний причорноморський регіон (рис. 5) охоплює центральну частину Одеської області та знаходиться, якщо розглядати в межах фізико-географічного районування, в степовій природній зоні на Причорноморській низовині.



Рис. 5 -- Фізико-географічна карта Північно-Західного Причорномор'я (чорна рамка)
Fig. 5 - Physical and geographical map of the North-Western Black Sea region (black box)

В Північному Причорномор'ї є велика кількість лиманів, тобто водойм повністю або частково відділених пересипом від моря. До найбільших відносяться Дністровський, Хаджибейський, Куяльницький та Тилігульський лимани. Окрім порізаності берегової лінії, цей фактор також може відігравати певну роль у створенні температурної неоднорідності підстильної поверхні. Річкова мережа в межах регіону складається з річок Великий та Середній Куяльники, а також Тилігул.

Поверхня території переважно рівнинна, з нахилом з північного заходу (максимальна висота над рівнем моря складає 150 м) на південний схід до узбережжя Чорного моря. Разом з тим, рівнина у багатьох містах пересічена глибокими долинами річок, ярами і балками (рис. 6). На морському узбережжі та на берегах лиманів перепад висот складає в середньому величину 40-50 м, в глибині материка останній зменшується до 20-30 м, який в північно-західній частині дещо збільшується за рахунок загального підйому висоти місцевості, зумовленого відрогами Подільської височини.

Останній рисунок був графічно зображений на базі сформованої матриці висот рельєфу, запозиченого з [12], яка відповідає за своїми геометричними розмірами та розмірами комірок прийнятій просторовій сітці, що на рис. 4, та буде використовуватися в подальшому чисельному моделюванні.

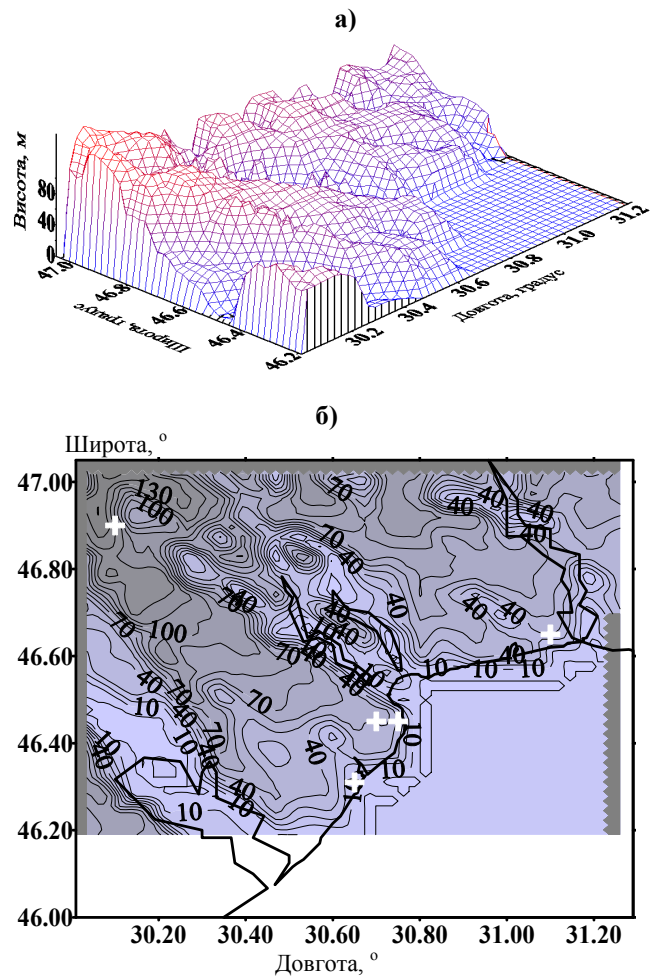


Рис. 6 – Поле рельєфу Північно-Західного Причорномор'я: а) об'ємне поле рельєфу; б) горизонтальне поле рельєфу
Fig. 6 - Relief field of the North-Western Black Sea region: а) three-dimensional relief field; б) horizontal relief field

2.5.4 Ґрунтові ресурси та їх теплофізичні характеристики

На обраній території спостерігаються переважно чорноземні ґрунти [13] (рис. 7).

Здебільшого зустрічаються чорноземи на лесових породах. До них відносяться звичайні (рис. 7 (1)), які розташовуються в північно-західній частині розглядуваного регіону, де трапляються середньогумусні та малогумусні глибокі, а також малогумусні неглибокі чорноземи. Міцелярно-карбонатні (рис. 7 (2)) розташовуються на західному узбережжі Дністровського лиману з різновидами малогумусних та малогумусних неглибоких. Південні (рис. 7 (3)) малогумусні та слабогумусовані види розташовуються широкою смугою на та біля узбережних районів між наявними лиманами. Залишково-солонцюваті (рис. 7 (4)) ґрунти зосереджується вузькою смугою над прибережними районами

з двох сторін Хаджибейського та Куяльницького лиманів, а також за Тилігульським лиманом на схід від останнього.

Чорноземи солонцюваті на щільних глинах (рис. 7 (5)) спостерігається загалом на верхів'ях Хаджибейського лиману та трохи північно-західніше уздовж яру останнього.

Щебенюваті на елювії щільних карбонатних порід (рис. 7 (6)) займають невелику порівняно площу, розташовану окремими осередками між Дніпровським і Хаджибейським та між Куяльницьким та Тилігульським лиманами.

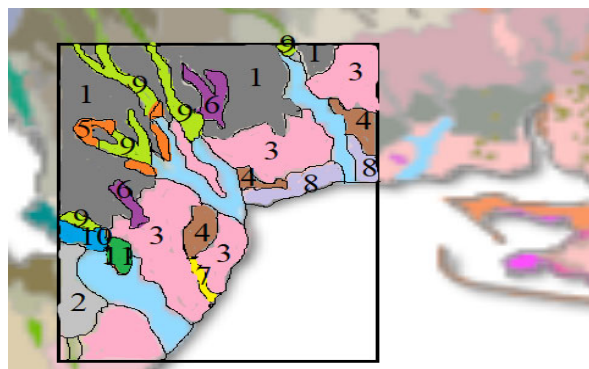
Лучно-чорноземні ґрунти переважно на лесовидних породах (рис. 7 (7)) можуть спостерігатися в дуже малих кількостях здебільшого в долині Бурлачої балки.

Темно-каштанові ґрунти переважно на лесових породах (рис. 7 (8)) відмічаються на узбережжі між Куяльницьким та Тилігульським лиманами, а також за останнім.

Лучні та чорноземно-лучні поверхнево-солонцюваті ґрунти (рис. 7 (9)) зосереджуються в долинах річок Середнього та Великого Куяльників, річки Тилігул та північніше від Дніпровського лиману.

Лучно-болотні ґрунти (рис. 7 (10)) розташовані на території Нижньодністерського національного природного парку та уздовж рівнинної долини на лівобережжі Дністра.

Дернові супіщані та суглинкові ґрунти (рис. 7 (11)) спостерігаються на дуже невеликій площі, розміщеній в пригірловій частині Дністра.



1 – чорноземи звичайні; 2 – чорноземи міцелярно-карбонатні; 3 – чорноземи південні; 4 – чорноземи залишково-солонцюваті; 5 – чорноземи солонцюваті на щільних глинах; 6 – чорноземи щебенюваті на елювії щільних карбонатних порід; 7 – лучно-чорноземні ґрунти переважно на лесовидних породах; 8 – темно-каштанові ґрунти переважно на лесових породах; 9 – лучні та чорноземно-лучні поверхнево-солонцюваті ґрунти; 10 – лучно-болотні ґрунти; 11 – дернові супіщані та суглинкові ґрунти.

Рис. 7 – Горизонтальний розподіл ґрунтів Північно-Західного Причорномор'я (чорна рамка).

Fig. 7 - Horizontal distribution of soils in the North-Western Black Sea region (black box).

Згідно з горизонтальним розподілом (рис. 7) ґрунтів в північно-західному причорноморському регіоні в кожному вузлі просторової сітки на поверхні землі задавалися відповідні теплофізичні характеристики підстильної поверхні, такі як об'ємна вага (або щільність ґрунту з урахуванням порів), питома вага (або вага твердої фази) і пористість ґрунту у відповідності з типом ґрунту (табл. 2), а також відповідний емпірично розрахований коефіцієнт температуропровідності.

Таблиця 2 – Теплофізичні характеристики різних типів ґрунтів на глибинах 0-10 см
Table 2 -- Thermophysical characteristics of various types of soils at depths of 0-10 sm

№ п/п	Тип ґрунту	Щільність, ρ_c , г/см ³	Питома вага, $\rho_{m.f.}$, г/см ³	Пористість, p , %
1	Чорноземи звичайні на лесах	1,00-1,17 [14]	2,44-2,67 [14]	58 [14]
2	Чорноземи міцелярно-карбонатні на лесах	1,20 [14]	2,61 [14]	54 [14]
3	Чорноземи південні на лесах	1,00 [14]	2,60 [14]	62 [14]
4	Чорноземи залишково-солонцюваті на лесах	1,00-1,22 [14]	2,4-2,5 [14]	51-58 [14]
5	Чорноземи солонцюваті на щільних глинах	1,40 [15]	2,65 [15]	47 [15]
6	Чорноземи щебенюваті на елювії щільних карбонатних порід	1,20 [16]	2,50 [16]	52 [16]
7	Лучно-чорноземні ґрунти на лесовидних породах	1,12 [17]	2,60 [17]	56 [17]
8	Темно-каштанові ґрунти залишково-солонцюваті на лесах	1,15-1,17 [14]	2,63-2,64 [14]	56 [14]
9	Лучні та чорноземно-лучні поверхнево-солонцюваті ґрунти	1,00 [15]	2,45 [15]	59 [15]
10	Лучно-болотні ґрунти	1,33 [18]	2,55 [18]	48 [18]
11	Дернові супіщані та суглинкові ґрунти	1,45 [14]	2,64 [14]	39 [14]

Використовуючи дані з табл. 2, коефіцієнт температуропровідності розраховуватиметься для кожного типу ґрунтів в залежності від щільності, ρ_c , $[\text{г}/\text{см}^3]$ та об'ємної вологості, w [%] [19]

$$K_s \cdot 10^3 = 2,1\rho_c^{1,2-0,02w} e^{0,007(w-20)^2} + \rho_c^{0,8+0,02w}$$

Якщо різноманітність типів ґрунтів не враховується, то для визначення коефіцієнта температуропровідності застосовується залежність лише від об'ємної вологості, формула для якої вже описана в [7]. Пористість використовується для визначення максимальної вологості або вологості насичення, яка застосовується при розв'язанні рівняння водного балансу.

2.5.5 Визначення параметру шорсткості підстильної поверхні

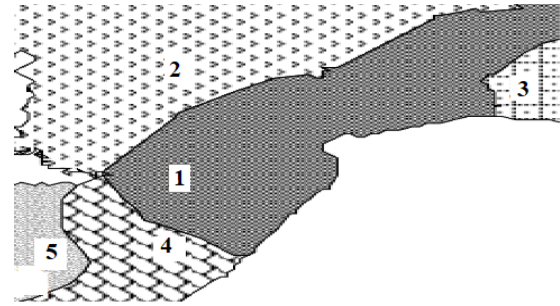
В цьому дослідженні враховуються також особливості шорсткості підстильної поверхні розглядуваного регіону, тобто для кожного вузла розрахункової області визначалося своє значення параметру шорсткості, яке надалі застосовувалося при рішенні задачі шару сталих потоків. Для цього необхідно було, по-перше, дослідити земельні ресурси регіону, їх види та ваговий розподіл; по-друге, визначити домінуючий тип природної рослинності та її середню висоту; по-третє, знайти середньо зважене значення параметру шорсткості, яке залежить від висоти елементів шорсткості різної етіології, покриваючих підстильну поверхню.

Нагадаю, що всі земельні ресурси розділяються на дві групи:

- сільськогосподарського (с/г) призначення: орна земля, багаторічні насадження, сінокоси й пасовища, перелоги;

- несільськогосподарського призначення: ліси та інші лісовкриті площі, забудовані землі, відкриті заболочені землі та відкриті землі без рослинного покриву або з незначним рослинним покривом.

Згідно з природно-сільськогосподарським районуванням, що детально описане в [20], у північно-західному регіоні Чорного моря зосереджено 5 природно-сільськогосподарських округів (рис. 8), які в свою чергу відносяться до певної провінції та зони в рамках районування.



1 - Дністровсько-Нижньо-Дніпровський округ; 2 - Південно-Бузько-Інгульський округ; 3 - Присивашський округ; 4 - Дунайсько-Дністровський округ; 5 - Задністровський округ

Рис. 8 - Схема розташування природно-сільськогосподарських районів в Північно-Західному Причорномор'ї
Fig. 8 - Layout of natural and rural districts in the North-Western Black Sea region

А саме, південна та північна відповідно частини двох округів з зони Степу: Південно-Бузько-Інгульського Степової Правобережної провінції та Задністровського Степової Придунайської провінції; південна та північна відповідно частини двох округів зі Степової посушливої зони: Дністровсько-Нижньо-Дніпровського Степової посушливої Правобережної провінції та Дунайсько-Дністровського Степової посушливої Придунайської провінції, а також західна частина Присивашського округу Сухостепової Присивашської провінції Сухостепової зони.

Частка с/г угідь з загальної площі земельних ресурсів відповідних округів (табл. 3 [20]) коливається в межах 0,82-0,89, з них на ріллю припадає 0,70-0,74, перелоги – 0,001-0,003, багаторічні насадження – 0,02-0,055, сіножаті – 0,002-0,008, пасовища – 0,05-0,12. Частка не с/г земель коливається в межах 0,11-0,18, з них на ліси та інші лісовкриті площі припадає 0,04-0,06, забудовані землі – 0,0035-0,07, відкриті заболочені землі – 0,005-0,09, відкриті землі без рослинного покриву або з незначним рослинним покривом – 0,009-0,06. В межах цього дослідження розподіл часток земельних ресурсів в межах округів приймається рівним відповідному розподілу в межах північно-західного регіону Причорномор'я. Тобто, якщо розрахункова точка знаходиться в Південно-Бузько-Інгульському окрузі (зона 2, див. рис. 8), це означає, що на цю точку впливають елементи шорсткості відповідних видів земельних угідь з вагою у частках одиниці, притаманною для всього округу (див. табл. 3).

Таблиця 3 – Частка земельних ресурсів, \tilde{m} , в природно-сільськогосподарських округах Північно-Західного Причорномор'я по районах [20]

Table 3 - Share of land resources, \tilde{m} , in natural and agricultural districts of the north-western Black Sea region by districts [20]

Зона	Степ								
Провінція	Степова Правобережна								
Округ	Південно-Бузько-Інгульський								
Вид земельних ресурсів	с/г угіддя (0,89)					не с/г землі (0,11)			
	рілля	Перелоги*	багаторічні насадження	сіножаці	пасовища	ліси та інші лісовкриті площі	забудовані землі	відкриті заболочені землі	відкриті землі без рослинного покриву або з незначним рослинним покривом
Схематичне позначення	\tilde{m}_p	\tilde{m}_n	$\tilde{m}_{он}$	\tilde{m}_c	\tilde{m}_{nc}	$\tilde{m}_л$	$\tilde{m}_{зз}$	$\tilde{m}_{бзз}$	$\tilde{m}_{ор}$
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частка від загальної площі округу,	0,74	0,002	0,02	0,006	0,12	0,06	0,035	0,006	0,009
Провінція	Степова Придунайська								
Округ	Задністровський								
Вид земельних ресурсів	с/г угіддя (0,88)					не с/г землі (0,12)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частка від загальної площі округу	0,70	0,001	0,051	0,008	0,12	0,05	0,05	0,010	0,010
Зона	Степова посушлива								
Провінція	Степова посушлива Правобережна								
Округ	Дністровсько-Нижньо-Дніпровський								
Вид земельних ресурсів	с/г угіддя (0,85)					не с/г землі (0,15)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частка від загальної площі округу	0,74	0,003	0,02	0,002	0,09	0,05	0,07	0,005	0,02
Провінція	Степова посушлива Придунайська								
Округ	Дунайсько-Дністровський								
Вид земельних ресурсів	с/г угіддя (0,82)					не с/г землі (0,18)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частка від загальної площі округу	0,71	0,001	0,055	0,004	0,05	0,04	0,04	0,09	0,01
Зона	Сухостепова								
Провінція	Сухостепова Присивашська								
Округ	Присивашський								
Вид земельних ресурсів	с/г угіддя (0,83)					не с/г землі (0,17)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частка від загальної площі округу	0,70	0,002	0,02	0,006	0,10	0,06	0,04	0,01	0,06

* - заросла дикою рослинністю і молодими деревами, задернована орна земля, що не оброблялася протягом 8-20 років поспіль

Таким чином, середньозважена висота елементів шорсткості для кожної зони, \tilde{h}_3 , визначатиметься за формулою:

$$\tilde{h}_3 = \tilde{m}_p \tilde{h}_p + \tilde{m}_n \tilde{h}_n + \tilde{m}_{он} \tilde{h}_{он} + \tilde{m}_c \tilde{h}_c + \tilde{m}_{nc} \tilde{h}_{nc} + \tilde{m}_л \tilde{h}_л + \tilde{m}_{зз} \tilde{h}_{зз} + \tilde{m}_{бзз} \tilde{h}_{бзз} + \tilde{m}_{ор} \tilde{h}_{ор}, \quad (33)$$

де $\tilde{h}_p, \tilde{h}_{nc}, \tilde{h}_{он}, \tilde{h}_c, \tilde{h}_{nc}, \tilde{h}_л, \tilde{h}_{зз}, \tilde{h}_{бзз}, \tilde{h}_{ор}$ - середньо зважені висоти по ріллі, перелогах, багаторічним насадженням, сінокосам, пасовищам,

лісам та іншим лісовкритим площам, забудованим землям, відкритим заболоченим місцям, відкритим землям без рослинності відповідно. Значення величин, які входять у формулу (33), не будуть наводитися за браком місця. Необхідно відмітити лише те, що для отримання останніх була проведена кропітка робота у визначенні предметної наповненості елементами шорсткості того чи іншого земельного угіддя, їх вагового внеску та просторового розподілення. При цьому тут також враховувався період року на предмет вегетації. Детальний опис проведеної роботи міститься у проміжному звіті про науково-

дослідну роботу «Дослідження особливостей термодинамічної структури турбулентного граничного шару атмосфери над північно-західним причорноморським регіоном України за допомогою чисельного моделювання» кафедри фізичного виховання та валеології.

Параметр шорсткості приймається лінійно залежним від середньозваженої висоти елементів шорсткості через коефіцієнт пропорційності, A

$$z_0 = A \cdot \tilde{h}_z, \quad (34)$$

де $A = z_{0cp} / \tilde{h}_z$, z_{0cp} - середнє значення для відповідного типу підстильної поверхні [21]. Тобто, в залежності від того трава це чи ліс, лісистість чи село, місто чи крупне місто буде визначатися значення коефіцієнта A (табл. 4).

Застосовуючи формулу (34), значення коефіцієнта A й значення середньозважених висот в метрах, отримаємо наступні значення параметру шорсткості. Як приклад, наведемо просторовий горизонтальний розподіл для травня (рис. 9).

Просторовий розподіл параметру шорсткості має яскраво виражену осередкову структуру. Найбільш високий осередок припадає на територію міста Одеса ($z_0=2,0$ м), його приміську зону ($z_0=0,6$ м), а також лісисту частину місцевості на південний захід від міста в районі розташування Державного ботанічного заказника ($z_0=0,8$ м). Невеликий відріг простягається також до міста Чорноморськ ($z_0=1,0$ м). Другий двоцентровий осередок зосереджується над територією Нижньодністерського національного природного парку ($z_0=1,4$ м), а третій -- уздовж ярів та балок

Таблиця 4 – Значення коефіцієнта A в залежності від типу підстильної поверхні у конкретній точці

Table 4 - Value of the coefficient A depending on the type of underlying surface at a particular point

Періоди вегетації (кількість днів з початку вегетації) або невегетаційний період	Тип підстильної поверхні	Коефіцієнт A
1-30, 31-60 днів	Трава низька	0,008
61-90, 90-120, 120-160 днів	Трава висока	0,023
Невегетаційний період	Скошена трава або оголена земля	0,016
-	Рідкий ліс	0,305
-	Ліс	0,482
-	Село	0,096
-	Місто	0,322
-	Крупне місто	0,804

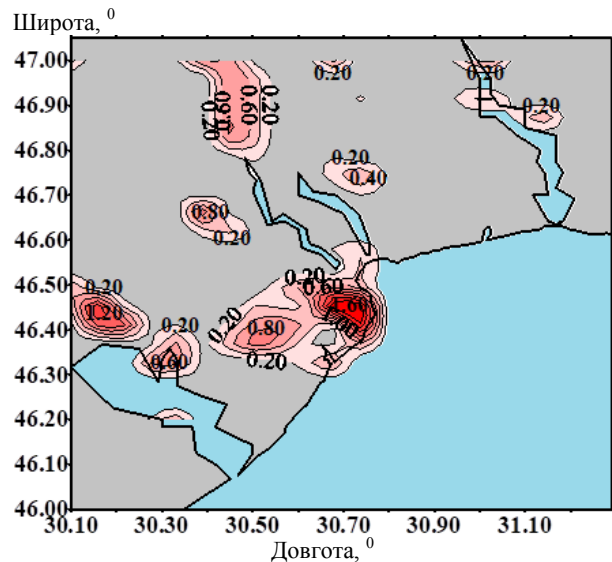


Рис. 9 – Просторовий розподіл параметру шорсткості в Північно-Західному Причорномор'ї у травні

Fig. 9 - Spatial distribution of the roughness parameter in the North-Western Black Sea region in May

у верхній частині Хаджибейського лиману ($z_0=1,0$ м). Решта осередків припадає або на лісисту місцевість, або на села. Фонове значення параметру шорсткості складає в середньому від 0,02 до 0,07 м.

2.5.6 Визначення альbedo підстильної поверхні

Окрім врахування рельєфу, типу ґрунтів та відповідно їх теплофізичних характеристик, а також детального опису шорсткості підстильної поверхні, в цій роботі також буде враховуватися просторовий розподіл альbedo. Причому останній отриманий для періоду вегетації та в невегетаційний період (рис. 10).

На розглядуваній території приймається 8 типів підстильних поверхонь: вода, трава, ґрунточорнозем, рідкий ліс, ліс, село, місто, крупне місто. Для них альbedo встановлювалося згідно з табл. 5 [19].

Значення альbedo для води приймалося рівним 8 як середньоарифметичне з діапазону типових його значень 5-10 %.

Альbedo для трави приймається у вегетаційний період як для свіжої зеленої трави, а в решту часу, окрім зимових місяців, як для сухої трави.

Оголоною підстильна поверхня рахується, починаючи з жовтня та закінчуючи березнем. Тут значення альbedo береться як середньоарифметичне між його значеннями у вологому та сухому стані чорноземних ґрунтів. В зимовий період враховується наявність нестійкого снігового покриву.

Таблиця 5 – Значення альbedo (%) різних типів підстильних поверхонь [19]

Table 5 - Albedo values (%) of various types of underlying surfaces [19]

Період року Тип підстильної поверхні	квітень- вересень	жовтень- листопад, березень	грудень- лютий
вода	8	8	8
трава	26	19	27
чорноземний ґрунт	-	11	22
рідкий ліс	21	18	22
ліс	15	24	23
село	24	15	25
місто	20	25	31
крупне місто	16	18	26

Значення альbedo для лісів береться як середньоарифметичне між значеннями останнього для хвойних та листяних лісів. В період пожовтіння крони дерев у лісах альbedo задається більшим.

Для рідкого лісу альbedo складається з його середньоарифметичного значення для трави та дерев у вегетаційний період, для оголеної землі й дерев – для решти періодів року.

Альbedo для села формується як середньоарифметичне між відповідними значеннями для рідкого лісу та трави, якщо розглядається у вегетаційний період, та для оголеної землі й рідкого лісу - для решти періодів року.

Альbedo для міст формується як середнє значення з типових градацій для такого типу підстильної поверхні.

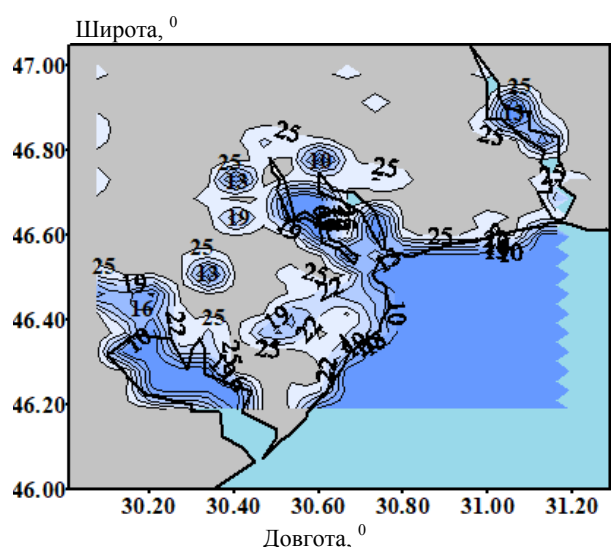


Рис. 10 – Просторовий розподіл альbedo підстильної поверхні у вегетаційний період

Fig. 10 - Spatial distribution of the underlying surface albedo during the growing season

В помірних широтах при нестійкому сніговому покриві альbedo складає величину біля 38 %. Згідно з [22] середня кількість днів зі сніговим покривом за зиму в розглядуваному регіоні складає 38 днів. Таким чином, саме 38 днів зі сніговим покривом альbedo складатиме величину 38 %, а в решту зимових днів – величину альbedo тої підстильної поверхні, яка розглядається. Виходячи з цього, було знайдене середнє за зиму значення альbedo для кожного типу підстильної поверхні (табл. 5, остання колонка).

Просторовий розподіл альbedo у вегетаційний період (рис. 10) має однорідну структуру всередині суходолу (26 %) та осередкову – на узбережжі лиманів та моря, де концентрується багато населених пунктів, а також над лісною місцевістю (15-21 %).

3. ВИСНОВКИ

Враховуючи вищенаведене, можна зробити такі висновки:

1) детальний опис чисельного розв'язку скінченнорізницевої початково-крайової задачі показав основні особливості моделі такого виду, дозволив зрозуміти роботу основних блоків математичної моделі з перспективою доповнення або збагачення постановки задачі додатковими членами без порушення умов збіжності, стійкості та точності використаних апроксимацій. Зокрема, автором були уведені дві складові у рівняння руху та припливу тепла, які відповідають за протиградієнтне перенесення та радіаційні притоки тепла;

2) отриманий горизонтальний розподіл висот рельєфу в сітковому розподіленні досить точно відтворює основні закономірності фізико-географічних умов реальної підстильної поверхні, що дасть змогу адекватно враховувати ефекти плавучості та динамічні зміни в повітряній масі, яка набігає на відповідні нерівності підстильної поверхні;

3) просторовий розподіл фізичних характеристик ґрунту, таких як пористість, питома вага, щільність в повній мірі відповідає горизонтальному розподілу основних типів ґрунту в області розрахунку, що в подальшому буде враховуватися при визначенні коефіцієнта температуропровідності ґрунту у відповідному рівнянні, а також для встановлення максимального та середнього значень об'ємної вологості у кожній сітковій точці;

4) використання методу подвійного врахування елементів шорсткості дозволив отримати параметр шорсткості, який відповідає конкрет-

ній точці в області розрахунку у вегетаційний та невегетаційний періоди року. Відповідний горизонтальний розподіл показав яскраву осередкову структуру у місцях зосередження населених пунктів або лісної місцевості;

5) детальне вивчення морфологічних особливостей підстильної поверхні (міська чи сільська забудови, ліс чи рідкий ліс, трава низька чи висока, оголена чи вкрита снігом поверхня) у кожній точці дозволило отримати просторовий розподіл альbedo в області розрахунку. Останній показав неоднорідність в місцях розташування лісів та населених пунктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тарнопольский А. Г. Математическое моделирование и прикладные задачи геофизического пограничного слоя: монография. Одесса: ТЭС, 2002. 394 с.
2. Тарнопольский А. Г., Шнайман В. А. Моделирование взаимодействующих атмосферного и пограничного слоев. *Метеорология и гидрология*. 1984. № 5. С. 48-56.
3. Тарнопольский А. Г., Шнайман В. А. Моделирование пограничного слоя атмосферы для городской застройки и пригородной зоны. *Метеорология и гидрология*. 1991. № 1. С. 41-47.
4. Тарнопольский А. Г., Шнайман В. А. Теоретические основы и оперативная схема расчета характеристик турбулентного обмена в шельфовой зоне моря. В сб. *Исследование шельфовой зоны Азово-Черноморского бассейна*. Севастополь: МГИ НАН Украины. 1995. С. 168-177.
5. Тарнопольский А. Г. Моделирование распространения нефтяной пленки на поверхности моря после аварийного разлива. *Метеорология, климатология и гидрология*. 2001. № 43. С. 198-210.
6. Тарнопольский А. Г. Моделирование геофизических процессов шельфовой зоны моря. *Диагноз состояния морской среды Азово-Черноморского бассейна*. Севастополь: МГИ НАН Украины. 1994. С. 145-151.
7. Иванова Е. В. Адаптированное к северо-западному Причерноморью мезомасштабное численное моделирование пограничного слоя атмосферы. Часть 1. Математическая постановка задачи. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 23. С. 5-22. <https://doi.org/10.31481/uhmj.24.2019.01>
8. Сперанский Л. С., Леженин А. А. О применении метода расщепления в моделях пограничного слоя атмосферы. *Труды ЗапСибНИИ*. 1985. № 75. с. 71-78.
9. Леженин А. А., Сперанский Л. С. Пространственная модель прогноза погоды в нижней тропосфере. *Труды ЗапСибНИИ*. 1984. № 63. с.53-62.
10. Репинская Р.П., Анискина О.Г. Конечно-разностные методы в гидродинамическом моделировании атмосферных процессов. Санкт-Петербург: ООО «Концепт», 2002. 171 с.
11. Марчук Г. И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. 304 с.
12. Карта высот. URL: <http://radiofanatic.ru/karta-vysot.html>. (дата обращения: 15.02.2019 р.)
13. Ґрунти. URL: <http://geomap.land.kiev.ua/soils.html>. (дата звернення: 15.02.2019 р.)
14. Атлас почв Украинской ССР / под ред. Крупского Н. К., Полупана Н. И. Киев: Издательство «Урожай», 1979. 159 с.
15. Шейн Е. В. Курс физики почв. Москва: Издательство МГУ, 2005. 430 с.
16. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. URL: <http://egrpr.esoil.ru/content/soils/soil134.html>. (дата обращения: 1.03.2020 р.)
17. Характеристика основных типов почв. URL: <https://infopedia.su/8xb5db.html>. (дата обращения: 15.03.2020 р.)
18. Изучение водно-физических и химических свойств почвы Приазовских плавней. URL: <https://livescience.ru/Статьи:Свойства-почвы-Приазовских-плавней> (дата обращения: 20.03.2020 р.)
19. Основы агрофизики: підручник/ Вершинин П. В., Мельникова М. К., Мичурин Б. Н. и др. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. 910 с.
20. Мартин А.Г., Осипчук С.О., Чумаченко О.М. Природно-сільськогосподарське районування України: моногр. Київ: ЦП "Компринт", 2015. 328 с.
21. Млявая Г. В. Влияние параметров шероховатости подстилающей поверхности на скорость ветра. *Buletinul AŞM. Ştiinţele vieţii*. 2014. № 2(323). С. 181-187.
22. Кліматичний кадастр України / ЦГО, УНД ГМІ, 2006 р.

REFERENCES

1. Tarnapol'skiy, A.G. (2002). *Matematicheskoe modelirovaniye i prikladnyye zadachi geofizicheskogo pogranichnogo sloya* [Mathematical modeling and the relevant objectives of the geophysical boundary layer]. Odessa: "TES". (in Russ.)
2. Tarnapol'skiy, A.G. & Shnaydman, V.A. (1984). Modelirovaniye vzaimodeystvuyushchikh atmosfernogo i pogranichnogo sloev [Modeling of interacting atmospheric and boundary layers]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 5, pp. 48-56. (in Russ.)
3. Tarnapol'skiy, A.G. & Shnaydman, V.A. (1991). Modelirovaniye pogranichnogo sloya atmosfery dlya gorodskoy zastroyki i prigorodnoy zony [Modelling of atmospheric boundary layer for urban and suburban areas]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1, pp. 41-47. (in Russ.)
4. Tarnapol'skiy, A.G. & Shnaydman, V.A. (1995). Teoreticheskie osnovy i operativnaya skhema rascheta kharakteristik turbulentnogo obmena v shel'fovoy zone morya [Theoretical bases and operational scheme of calculation of characteristics of turbulent exchange in the offshore zone of the sea]. *Issledovanie shel'fovoy zony Azovo-Chernomorskogo basseyna* [Study of the shelf zone of the Azov-black sea basin], pp. 168-177. (in Russ.)
5. Tarnapol'skiy, A.G. (2001). Modelirovaniye rasprostraneniya neftyanoy plenki na poverkhnosti morya posle avariynogo razliva [Modeling of oil film spreading on the sea surface after an emergency spill]. *Meteorologiya, klimatologiya i gidrologiya* [Meteorology, climatology and hydrology], 43, pp. 198-210. (in Russ.)
6. Tarnapol'skiy, A.G. (1994). Modelirovaniye geofizicheskikh protsessov shel'fovoy zony morya [Modeling of geophysical processes of the offshore zone of the sea]. *Diagnoz sostoyaniya morskoy sredy Azovo-Chernomorskogo basseyna* [Diagnosis of the state of the marine environment of the Azov-black sea basin],

- Sevastopol: MHI NAS of Ukraine. pp. 145-151. (in Russ.)
7. Ivanova, E.V. (2019). Adaptirovannoe k severo-zapadnomu Prichernomor'yu mezomasshtabnoe chislennoe modelirovanie pogranichnogo sloya atmosfery. Chast' 1. Matematicheskaya postanovka zadachi [The mesoscale numerical simulation of the atmosphere boundary layer adapted to the North-Western Black sea region. Part 1. Mathematical formulation of the problem.]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 23, pp. 5-22. (in Russ.) <https://doi.org/10.31481/uhmj.24.2019.01>
 8. Speranskiy, L.S. & Lezhenin, A.A. (1985). O primeneniі metoda rasshchepleniya v modelyakh pogranichnogo sloya atmosfery [An application of method Of splitting, in models of the atmospheric boundary layer]. *Trudy ZapSibNII [Proceedings of the West Siberian research Institute]*, 75, pp. 71-78. (in Russ.)
 9. Lezhenin, A.A. & Speranskiy L.S. (1984). Prostranstvennaya model' prognoza pogody v nizhney troposfere [Spatial model of weather forecast in the lower troposphere]. *Trudy ZapSibNII [Proceedings of the West Siberian research Institute]*, 63, pp.53-62. (in Russ.)
 10. Repinskaya, R.P. & Aniskina, O.G. (2002). *Konechno-raznostnye metody v gidrodinamicheskom modelirovanii atmosferykh protsessov [Finite-difference methods in hydrodynamic modeling of atmospheric processes]*. Saint-Petersburg: LLC "Concept". (in Russ.)
 11. Marchuk, G.I. (1979.) *Chislennoe reshenie zadach dinamiki atmosfery i okeana [Numerical solution of atmospheric and ocean dynamics problems]*. Leningrad: Hydrometeorological publishing house. (in Russ.)
 12. *Karta vysot [Height map]*. Available at: <http://radiofanatic.ru/karta-vysot.html> (Accessed: 15 February 2019). (in Russ.)
 13. *Gruntly [Soils]*. Available at: <http://geomap.land.kiev.ua/soils.html> (Accessed: 15 February 2019). (in Ukr)
 14. Krupskiy, N.K. & Polupan, N.I. (1979). *Atlas pochv Ukrainskoy SSR [Atlas of soils of the Ukrainian SSR]*. Kiev: Publ «Urozhaj». (in Russ)
 15. Shein, E.V. (2005). *Kurs fiziki pochv [Soil physics course]*. Moscow: Publishing house of Moscow state University. (in Russ)
 16. *Edinyy gosudarstvennyy reestr pochvennykh resursov Rossii [Unified state register of soil resources of Russia]*. Available at: <http://egrpr.esoil.ru/content/soils/soil134.html> (Accessed: 1 March 2019). (in Russ)
 17. *Kharakteristika osnovnykh tipov pochv [Characteristics of the main types of soils]*. Available at: <https://infopedia.su/8xb5db.html> (Accessed: 15 March 2019). (in Russ)
 18. *Izuchenie vodno-fizicheskikh i khimicheskikh svoystv pochvy Priazovskikh plavney [Study of water-physical and chemical properties of the soil of the Priazovsky floodplains]*. Available at: <https://livescience.ru/Статьи:Свойства-почвы-Приазовских-плавней> (Accessed: 20 March 2019). (in Russ)
 19. Vershinin, P.V., Mel'nikova, M.K., Michurin, B.N. et al. (1959). *Osnovy agrofiziki [Fundamentals of agrophysics]*. Moscow: State publishing house of physical and mathematical literature. (in Russ)
 20. Martin, A.G., Osipchuk, S.O. & Chumachenko, O.M. (2015). *Pryrodno-silskogospodarske raionuvannia Ukrainy [Natural and agricultural zoning of Ukraine]*. Kyiv: «Komprint».
 21. Mlyavaeva, G.V. (2014). Vliyanie parametrov sherokhovatosti podstilayushchey poverhnosti na skorost' vetra [Influence of the underlying surface roughness parameters on wind speed]. *Buletinul AŞM. Ştiinţele vieţii [ASM ID. Life sciences]*, 2(323), pp. 181-187.
 22. *Klimatychnyi kadastr Ukrainy [Climate cadastre of Ukraine]*. (2006). CGO, UR HMI.

MESOSCALE NUMERICAL MODELING OF THE BOUNDARY LAYER OF THE ATMOSPHERE ADAPTED TO THE NORTHWESTERN BLACK SEA REGION. PART 2. FINITE-DIFFERENCE SOLUTION AND ADAPTATION TO REAL PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL CONDITIONS OF THE AREA

E. V. Ivanova

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

The article describes the finite-difference solution of the system of differential equations of the atmospheric boundary layer hydrothermodynamics adapted to the Northwestern Black Sea region. The research presents the description of the sequence of calculations schematically shown on the flowchart. The applied mathematical model was adapted in relation to five aspects: coast geomorphology (coastline shape), land geomorphology (actual terrain of the studied territory), thermal and physical characteristics of soil (density, specific gravity, porosity, thermal conductivity factor), roughness (roughness parameter) and optical characteristics (albedo) of the underlying surface. The coastline shape was described with consideration of water proportion available in the current cell of the spatial grid. If the proportion exceeded 50 %, it was assumed that such cell includes land, and vice versa. The terrain matrix was formed by removing the elevation values at each point of the calculated area from official electronic elevation maps. The thermal and physical characteristics of the soil were set depending on a type of soil observed at the current calculated point. The method of roughness elements double recording during growing and non-growing periods of the year was used to consider the roughness of the underlying surface.

This method consists in the fact that, depending on the agricultural zoning and its subject content, there is a certain background weighted average value of roughness elements ensemble elevation that transforms into a roughness parameter through the proportionality factor. In such a case, the proportionality factor is linked to a type of a real roughness element at a specific point. Thus, a comprehensive assessment of roughness features of the territory under study was obtained. The albedo of the underlying surface was taken for three various periods of the year: growing period (April-September), post-growing period – months before winter and the first month of spring (October-November, March) and winter period (December-February). Nature of the external coating of the underlying surface related to optical properties should be also taken into account.

Keywords: three-dimensional model, boundary layer of the atmosphere, finite-difference analogue, turbulence, meteorological values, numerical solution, coastline, terrain, horizontal field, soil types, thermal and physical characteristics of soil, roughness of underlying surface, albedo.

АДАПТОВАННОЕ К СЕВЕРО-ЗАПАДНОМУ ПРИЧЕРНОМОРЬЮ МЕЗОМАСШТАБНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ. ЧАСТЬ 2. КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЕ РЕШЕНИЕ И АДАПТАЦИЯ К РЕАЛЬНЫМ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ МЕСТНОСТИ

Е. В. Иванова

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

В статье приводится описание конечно-разностного решения системы дифференциальных уравнений гидротермодинамики пограничного слоя атмосферы, адаптированной к Северо-Западному Причерноморью. Предоставляется описание последовательности проведенных расчетов, схематически изображенной на блок-схеме. Адаптация использованной математической модели проводилась в пяти аспектах: геоморфология побережья (форма береговой линии), геоморфология суши (реальный рельеф территории), теплофизические характеристики грунта (плотность, удельный вес, пористость, коэффициент температуропроводности), шероховатость (параметр шероховатости) и оптические характеристики (альбедо) подстилающей поверхности. Форма береговой линии описывалась через учет доли воды в текущей ячейке пространственной сетки. Теплофизические характеристики почвы задавались в зависимости от типа почвы, наблюдаемой в текущей расчетной точке. Для учета шероховатости подстилающей поверхности использовался метод двойного учета элементов шероховатости в вегетационный и невегетационный периоды года в зависимости от сельскохозяйственного районирования и его предметного наполнения. Альбедо подстилающей поверхности принималось различным в три периода года: вегетационный период года (апрель-сентябрь), после вегетационный - до зимы, включая первый месяц весны (октябрь-ноябрь, март) и зимний период года (декабрь-февраль). При этом учитывался также характер внешнего покрытия подстилающей поверхности на предмет оптических свойств.

Ключевые слова: трехмерная модель, пограничный слой, конечно-разностный аналог, турбулентность, метеорологические величины, численное решение, береговая линия, рельеф, горизонтальное поле, типы почв, теплофизические характеристики почвы, шероховатость подстилающей поверхности, альбедо.

*Подання до редакції : 23. 06. 2020
Надходження остаточної версії : 04. 12 . 2020
Публікація статті : 17. 12 . 2020*

УДК 37.21.31; 37.21.37

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМУ ТА ШВИДКОСТІ ВІТРУ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

М. М. Коман

Український гідрометеорологічний інститут,
пр-т Науки, 37, 03028, Київ, Україна, mishakoman@gmail.com

Метою даної статті є визначення напрямку і швидкості вітру на знімках з геостационарних штучних супутників Землі та нанесення двовимірних векторів вітру, величина та напрямок яких відповідає швидкості та руху хмарних мас, на супутникове зображення для застосування у системі короткострокового прогнозу небезпечних погодних явищ для території України.

Для роботи методики необхідно виділити хмарні області на супутниковому зображенні, використовуючи пороговий метод. Після чого на основі особливості розподілу температури яскравості між двома модулями відстеження (частини зображення, між якими проводиться порівняння двох послідовних супутникових зображень) визначається максимальний коефіцієнт кореляції для інфрачервоної температури яскравості, що відповідає переміщенню хмарних мас і встановлює початок і кінець вектору напрямку вітру.

Для визначення оптимального застосування методики для території України проведено аналіз точності між різними розмірами модулів відстеження. При аналізі було виявлено, що точність визначення напрямку вектору вітру залежить від розміру модуля відстеження - чим більший модуль відстеження, тим точніше визначається напрям вектору, але, враховуючи часовий інтервал між зображеннями у 15 хвилин, оптимальним для застосування на території України є алгоритм з модулем відстеження 5x5 пікселів.

Також, здійснено порівняння роботи методики з даними прогностичних моделей ICON та GFS. Напрямок руху повітряних мас за результатами роботи алгоритму виявився більш надійним, ніж дані прогностичних моделей, оскільки алгоритм аналізує переміщення повітряних мас в реальному часі, а прогностичні моделі розраховують утворення і переміщення повітряних мас завчасно (з інтервалом у часі від декількох до десятків годин). Чисельний прогноз швидкості вітру моделей ICON та GFS є більш точним, оскільки алгоритм визначає швидкість вітру за переміщенням хмарних мас на супутникових зображеннях, а прогностичні моделі при розрахунках беруть до уваги декілька факторів (поля тиску, розвиток і подальшу еволюцію циклонів, антициклонів, географічні характеристики місцевості та ін.), що робить їх більш реалістичними.

Ключові слова: супутникові зображення, коефіцієнт кореляції, напрям вітру, швидкість вітру

1. ВСТУП

Велика роль в сучасних дослідженнях земної атмосфери відводиться метеорологічним штучним супутникам Землі. Можливість здійснення за їх допомогою глобальних спостережень відкриває величезні перспективи отримання різноманітної інформації про стан атмосфери і земної поверхні, необхідної для розв'язання широкого кола наукових і прикладних задач [1].

Поява супутникової інформації поклала початок розвитку нових методів дослідження, оскільки інформація, що надходить, істотно відрізняється від традиційних наземних спостережень. Якщо спостереження з земної поверхні просторово дискретні, то дані космічних апаратів є нерозривними у просторі, що дозволяє наочно

оцінити просторове поле різних метеовеличин в різних спектральних каналах.

Найбільш очевидною є потреба у супутниковій інформації для забезпечення безпеки польотів авіації та судноводіння. Велика просторова й часова протяжність маршрутів, прилеглих часто до районів з розрідженою мережею метеорологічних станцій, робить супутникові дані майже єдиним джерелом інформації про погоду в цих районах. Зрозумілою є величезна увага дослідників, яку приділяють питанням використання супутникової інформації для аналізу і прогнозу погоди.

Особливо зросла роль супутникової інформації після розширення в останні роки мережі наземних пунктів її прийому, що зробило доступною цю інформацію для використання в опера-

тивних прогнозах погоди [2].

Форма і структура хмарних утворень, їх еволюція та переміщення відображають складний комплекс фізичних процесів, що протікають в атмосфері. Від характеру цих процесів залежить картина розподілу хмар на знімках, тому зображення хмарності, разом з радіаційними вимірами, можна використовувати для оцінки синоптичної ситуації та уточнення розподілу та еволюції певних метеорологічних величин, які безпосередньо за допомогою супутників не вимірюються.

Синоптичний аналіз над районами Земної Кулі, мало освітленими метеорологічними даними, надзвичайно ускладнений. Тому кількісна інформація про швидкість і напрямок зміщення окремих хмарних масивів, що характеризується напрямом і швидкістю вітру, представляється надзвичайно важливою, адже може вказувати на розвиток і поширення небезпечних погодних явищ (грози, град, сильний вітер, зливи).

Небезпечні погодні явища зазвичай утворюються за умови наявності сильних висхідних потоків повітря, що виділяються на супутникових знімках у вигляді чітко виділеної холодної області верхньої межі хмарності (зі збільшенням сили висхідного потоку зменшується температура повітря). Досліджуючи розвиток та рух таких зон з низькою температурою верхньої межі хмар, можна прогнозувати напрям та швидкість руху небезпечних погодних явищ за супутниковими даними.

Тому в Українському гідрометеорологічному інституті було адаптовано метод визначення напрямку та швидкості вітру за супутниковими даними та проаналізовано точність цього методу відповідно до розміру модулів відстеження.

Метою даної статті є опис алгоритму визначення напрямку і швидкості вітру за супутниковими зображеннями та аналіз його ефективності для території України.

2. ОПИС ВИКОРИСТАНИХ ДАНИХ

У цій роботі використовуються дані з Геостаціонарного супутника MSG-3 [3]. Супутник розташовується на постійній висоті 35786 км над рівнем моря (ексцентриситет дорівнює 0). Саме така висота забезпечує супутнику період обертання, рівний сидеричному періоду обертання Землі (23 години 56 хвилин). Тобто, супутник обертається навколо планети з кутовою швидкістю, що дорівнює кутовій швидкості обертання Землі навколо своєї осі й начебто непорушно зависає в небі.

Радіометр SEVIRI (Spinning Enhanced Visible

and Infrared Imager), встановлений на супутниках MSG, має 12 каналів, які дозволяють отримувати зображення поверхні Землі кожні 5 (MSG-1) або 15 хвилин (MSG-2,3). Канал з високою роздільною здатністю (HRV) у видимому діапазоні має роздільну здатність (в підсупутникової точці над низькими широтами) 1 км, решта каналів - 3 км. Важливими для аналізу конвективних систем є в основному канали: 0,6; 1,6; 10,8 і 12,0 мкм а також поєднання різних каналів [4]. Просторова роздільна здатність в підсупутникової точці по Україні становить 6-8 км, а в каналі високого просторового розділу (HRV) - 2-3 км.

Для створення зображень використовуються дані геостаціонарного супутника MSG-3, що надходять зі станції прийому первинних супутникових даних на станцію прийому в Українському гідрометеорологічному інституті [2]. Дані у вигляді Level 1.5 raw data [5] з спектрального каналу 10,8 мікрометрів трансформуються програмним забезпеченням SUMO [6] у проєкцію «Plate Carree» та зберігаються у форматі .JPG для подальшого використання.

Для порівняння отриманих результатів використовуються дані прогностичних моделей ICON [7,8] та GFS [8,9]

3. МЕТОД ОТРИМАННЯ ПОЛЯ ВІТРУ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

Існує цілий ряд методик [10,11,12,13,14], які на основі аналізу супутникових знімків дозволяють: відновлювання і прогнозування чисельних значень геопотенціалу, висоти верхньої межі хмарності, напрямку і швидкості вітру у Землі і на висотах; відновлювати і прогнозувати поля тиску у Землі і геопотенціалу на висотах, розрахунок швидкості вітру методом максимального коефіцієнту кореляції. Із перелічених методик для визначення напрямку і швидкості вітру використовується метод максимального коефіцієнту кореляції [14].

Геостаціонарні метеорологічні супутники дозволяють отримати зображення поверхні Землі, де кожен піксель відповідає температурі підстилаючої поверхні у $^{\circ}\text{C}$. За допомогою цих зображень можна визначити напрям та швидкість вітру. Ця методика полягає у порівнянні послідовних супутникових знімків між собою. Напрямок руху хмарних мас відповідає напрямку вітру, а швидкість їх руху – швидкості вітру.

Для відображення напрямку та швидкості вітру в алгоритмі використовуються вектори, для побудови яких необхідні чотири показники: ши-

роти і довготи відправної точки, напрям вектору вітру (одиниця: кут маси за годинниковою стрілкою істинної півночі) та розмір вектору (одиниця: м/с).

Відповідно до аналізу особливостей хмар на зображенні, можна виконати бінаризовану обробку для хмарних зображень за допомогою порогового методу і визначити хмарні пікселі на зображенні. Після чого використовується метод коефіцієнту кореляції для інфрачервоної температури яскравості [14], що дозволяє за максимальним коефіцієнтом кореляції визначити напрям вектору вітру.

3.1 Виявлення хмари

Існує багато способів визначення хмарності [15,16], найбільш часто використовується пороговий метод на основі температури верхньої межі хмарності. В даній роботі пороговий метод використовується для виділення хмарності з особливо низькою температурою, що характерна для стихійних погодних явищ (зливи, грози, град, тощо) [17].

Для особливо небезпечної хмарності характерні температури нижче $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18] (виділяючи такі частини зображення можна спостерігати за розвитком стихійних погодних явищ).

Середнє значення температури розраховується як порогове значення, визначене наступним чином

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b(i, j)}{mn} \quad (1),$$

де в сумі значення температури

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b(i, j)$$

загальна кількість значень в зоні m пікселів по осі x та n пікселів по осі y на першому зображенні.

Для подальшої роботи виділяється хмарна матриця розміром 5×5 пікселів на зображенні. Якщо середнє значення температури обраної області більше порогового, вважається, що пікселі є хмарними, і можна визначити вектори напрямку та швидкості вітру. Однак, якщо середнє значення температури обраної області менше, ніж обраний поріг, можна розглядати цю область як безхмарну. Це місце розглядається як нульова область, без векторів напрямку та швидкості вітру. Коли обробка зображення завершена і виділені усі хмарні області, наступний крок полягає

у відповідності хмарних областей на послідовних зображеннях.

3.2 Визначення швидкості вітру

Для порівняння хмарних областей на двох послідовних зображеннях використовується, згідно з дослідженням [14], коефіцієнт кореляції між двома модулями відстеження (частини зображення між якими проводиться порівняння S_0 на першому зображенні і S_1 - на другому), що визначається наступним чином

$$OC(I, J, M, N) = \frac{\sum \sum [S_0(i, j) S_1(i, j)]}{\sqrt{\sum \sum S_0(i, j)^2 \sum \sum S_1(i, j)^2}}, \quad (2)$$

де $OC(I, J, M, N)$ - коефіцієнт кореляції; $S_0(i, j)$ - значення пікселю з координатами (i, j) у модулі відстеження S_0 на 1-му зображенні; $S_1(i, j)$ - значення пікселю з координатами (i, j) у модулі відстеження S_1 на 2-му зображенні; S_0 - модуль відстеження на 1-му зображенні з центром (I, J) ; S_1 - модуль відстеження на зображенні, отриманому через 15 хвилин після першого, і центром (M, N) .

Для розрахунку коефіцієнта кореляції використовується два зображення (рис. 1) з різницею у 15 хвилин. На першому зображенні виділяється модуль відстеження S_0 розміром 5×5 пікселів з центром у точці А, що буде початком вектору. Для порівняння на 2-му зображенні вибирається цільовий модуль S розміром 50×50 пікселів з центром в точці А. У цій зоні виділяється модуль відстеження S_1 розміром 5×5 пікселів з центром у точці В, для якої розраховується коефіцієнт кореляції (2), по суті виконується порівняння з модулем відстеження S_0 на 1-му зображенні, після чого точка В і весь модуль відстеження S_1 переміщується на 5 пікселів і знову розраховується коефіцієнт кореляції (2). Це повторюється доки модуль відстеження S_1 не досягне кінця цільового модуля пошуку S , після чого визначається модуль відстеження S_1 з найбільшим коефіцієнтом кореляції, центр якого, точка В, і буде кінцем вектору напрямку руху хмарності. Це означає, що хмарність представлена на 1-му зображенні модулем відстеження S_0 через

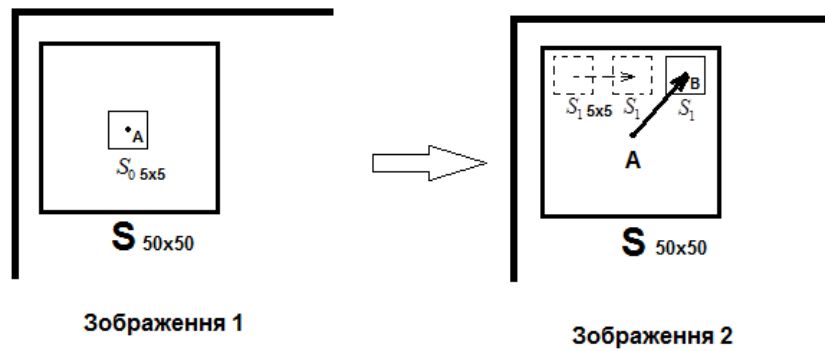


Рис.1 - Схема роботи алгоритму
Fig.1 - The scheme of the algorithm

15 хвилин буде представлена на 2-му зображенні модулем відстеження S_1 .

Для визначення швидкості вітру потрібно розрахувати

$$WS = \frac{R\theta}{\Delta t},$$

де WS - швидкість вітру; R – радіус Землі;
 Δt – час між послідовними зображеннями;

$$\theta = \cos^{-1}[\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1)],$$

де λ_1, φ_1 - широта та довгота точки А (початку вектору); λ_2, φ_2 - широта та довгота точки В (кінець вектору).

Розмір вектору залежить від швидкості вітру.

Вподальшому дані операції повторюються для кожного п'ятого пікселя області хмарності 1-го зображення і наприкінці роботи алгоритму отримується зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру, представлено нижче (рис. 2). На рис. 2 виділено 3 прямокутники: 1-й вказує на частину зображення з відсутньою хмарністю, 2-й вказує на частину зображення з хмарністю температурою вищою за -33°C , а 3-й прямокутних вказує на частину зображення з хмарністю температурою нижчою за -33°C .

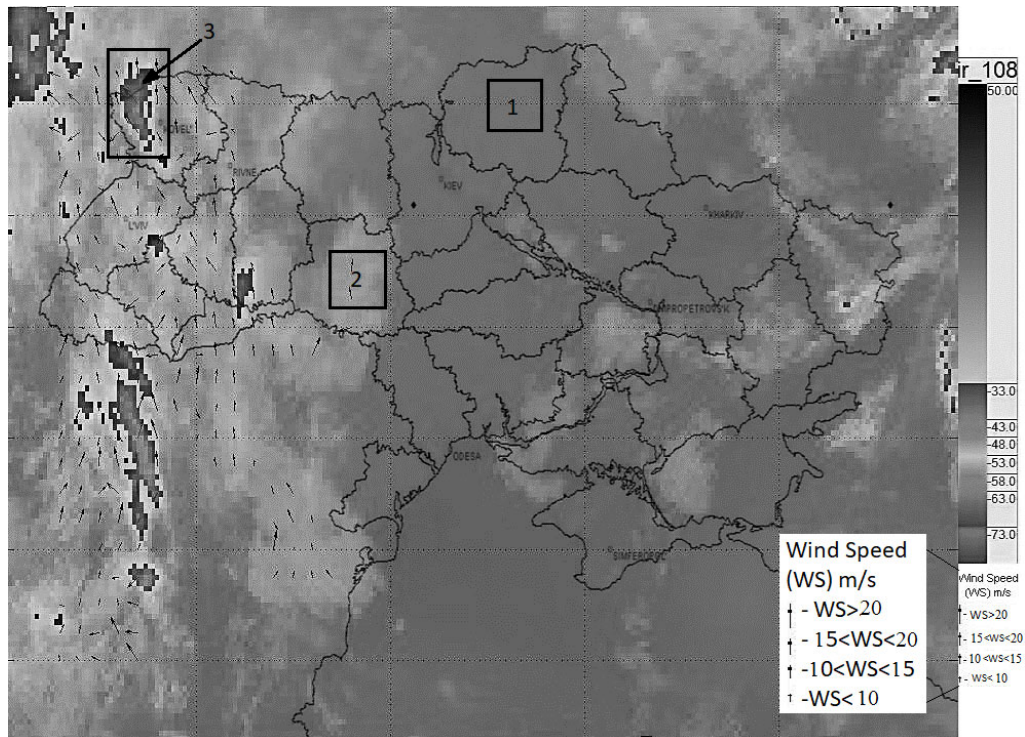


Рис.2 - Супутникове зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру
Fig.2 - Satellite image with applied vectors of wind direction and speed

4. АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ АЛГОРИТМУ ПРИ РІЗНИХ РОЗМІРАХ МОДУЛЕЙ ВІДСТЕЖЕННЯ

Для найкращої роботи алгоритму на території України, було проведено порівняння роботи моделі при різних розмірах модулів відстеження S_0, S_1 і цільового модуля S (табл.1). Розмір супутникового зображення 925x730 пікселів. Розмір одного пікселя приблизно (залежно від широти) - 6 км. Для точності порівняння різних модулів відстеження аналізувалися супутникові зображення з інтервалом в 1 годину, оскільки модуль відстеження 16x16 пікселів при порівнянні зображень з інтервалом 15 хвилин працює неточно через незначну відстань переміщення повітряних мас по відношенню до розміру цільового модуля.

Таблиця 1 - Модулі, що порівнювалися
Table 1 - Modules being compared

Модуль відстеження	Крок	Цільовий модуль
4x4	4	40x40
5x5	5	50x50
8x8	8	64x64
16x16	16	128x128

Результати аналізу роботи алгоритму показали, що найточніше виявляються вектори над

великими повітряними масами з чітко визначеним напрямом руху (напрямок вітру не змінюється), та пороговим значенням (середнє значення температури) нижчим за $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При пороговому значенні вище $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ повітряні маси знаходяться на низькій висоті, не мають чітко вираженої форми (швидко її змінюють або просто зникають на наступному зображенні), що робить коректне визначення вектору над ними неточним.

При аналізі було виявлено, що точність визначення напрямку вектору вітру залежить від розміру модуля відстеження, чим більший модуль відстеження, тим точніше визначається напрям вектору, це пов'язане з тим що при більшому розмірі модуля відстеження (S_0), на послідовному зображенні менше модулів відстеження (S_1) будуть мати схоже середнє значення температури до модуля відстеження (S_0) на першому зображенні, що дозволяє точніше визначити коефіцієнт кореляції.

Алгоритм з модулем відстеження 16x16 пікселів визначає вектори вітру найточніше, але не є доцільним для застосування на території України, оскільки розрахований на великі території або набагато більший період часу між зображеннями (3 години). Приклад наведений для 12.03.2017р. 10.00 – перше зображення і 11.00 – друге зображення (рис. 3).

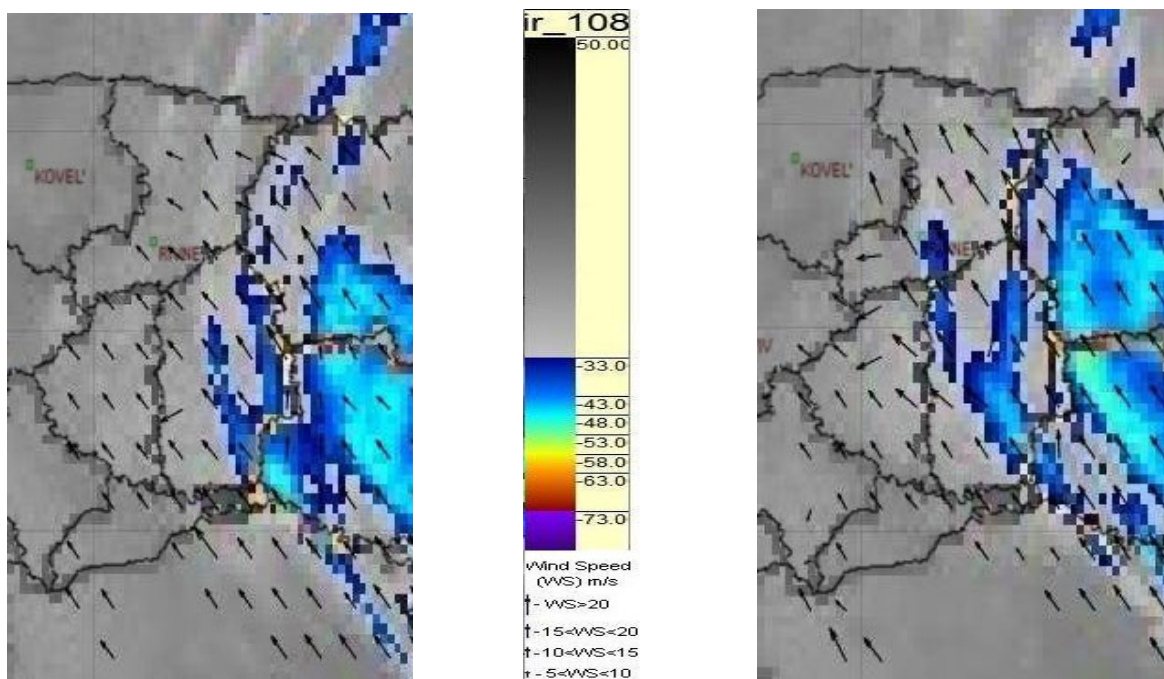


Рис. 3 - Супутникові зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру з модулем відстеження 16x16 пікселів та інтервалом у часі в 1 годину

Fig. 3 - Satellite images with applied vectors of wind direction and speed with a tracking module of 16x16 pixels and a time interval of 1 hour

Алгоритм з модулем відстеження 8x8 пікселів визначає вектори вітру достовірно відносно реального переміщення хмарних мас, придатний для території України, якщо проводити аналіз супутникових зображень з інтервалом

в 1 годину(рис. 4).

Алгоритм з модулем відстеження 5x5 пікселів визначає вектори вітру достовірно, оптимальний для застосування на території України з інтервалом між зображеннями у 15 хвилин (рис. 5).

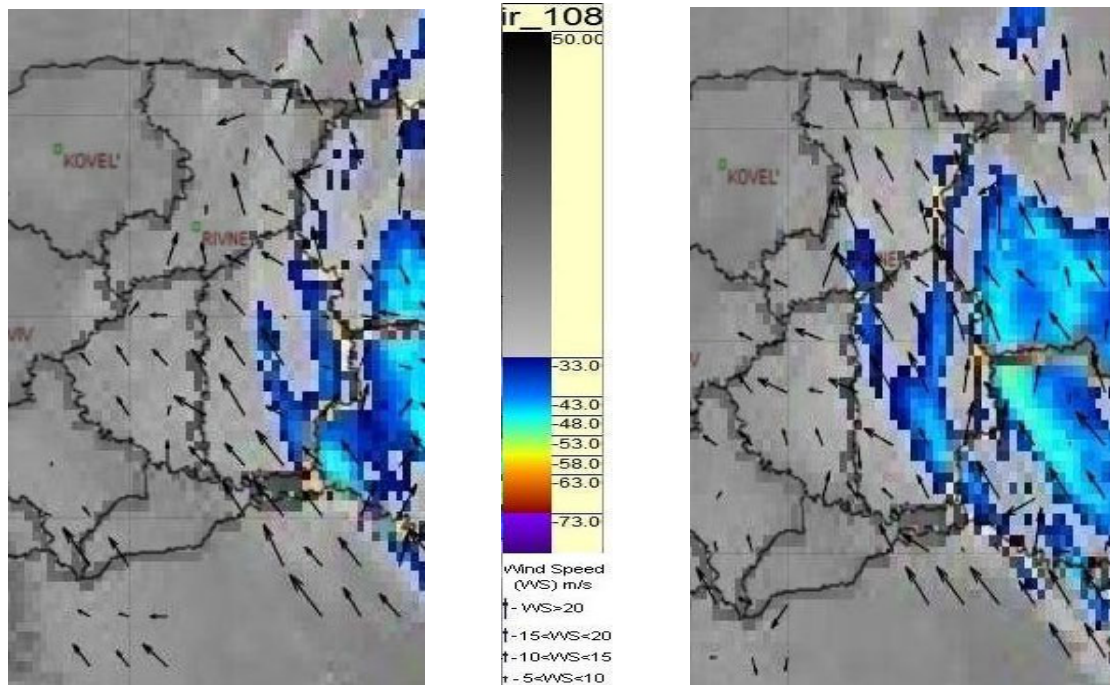


Рис. 4 - Супутникові зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру з модулем відстеження 8x8 пікселів та інтервалом у часі в 1 годину

Fig. 4 - Satellite images with applied vectors of wind direction and speed with a tracking module of 8x8 pixels and a time interval of 1 hour

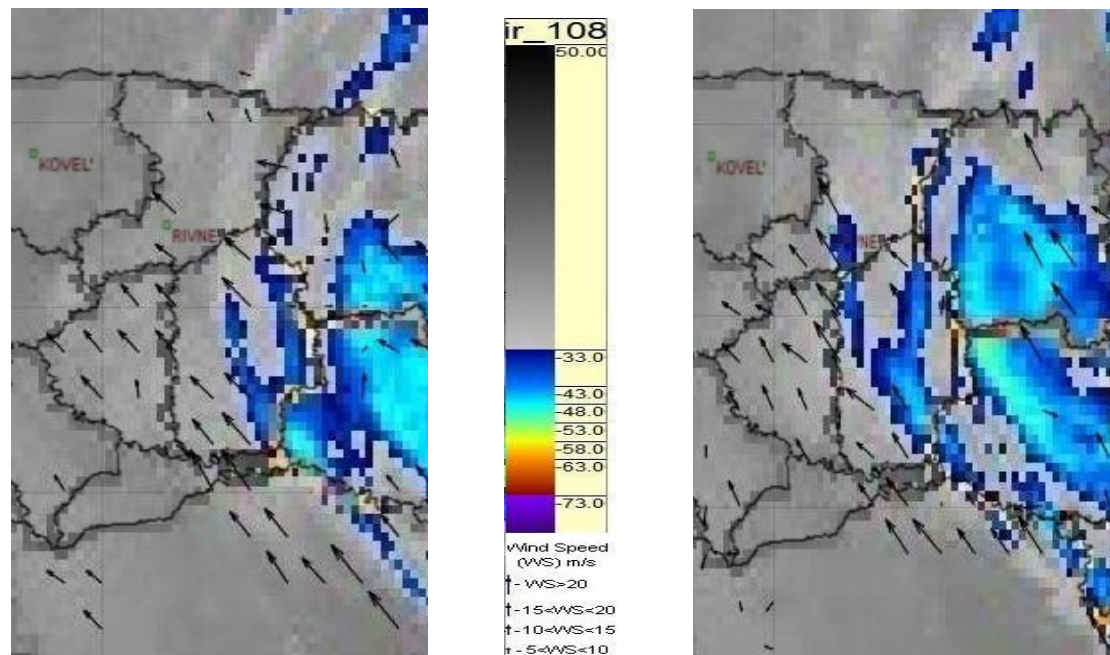


Рис. 5 - Супутникові зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру з модулем відстеження 5x5 пікселів та інтервалом у часі в 1 годину

Fig. 5 - Satellite images with applied vectors of wind direction and speed with a tracking module of 5x5 pixels and a time interval of 1 hour

Алгоритм з модулем відстеження 4x4 пікселя визначає вектори вітру хаотично, і не є оптимальним для території України, оскільки має менший модуль відстеження, що призводить до більшої кількості варіантів модулів відстеження на другому зображенні з середнім значенням температури наближаючимися до середнього значення температури модуля відстеження першого зображення, з яким і проводиться аналіз. Це призводить до некоректного визначення на

пряму вектору, також після нанесення векторів з кроком 4 пікселі зображення стає менш розбірливим. На рис. 6 добре видно хаотичність напрямків векторів вітру. Алгоритм з модулем відстеження 4x4 пікселя рекомендується застосовувати для значно меншої території. На рис. 7 наведено приклад роботи алгоритму з температурою верхньої межі хмарності нижчою за порогове значення, тобто зображення з чітко виділеною хмарністю. При аналізі було

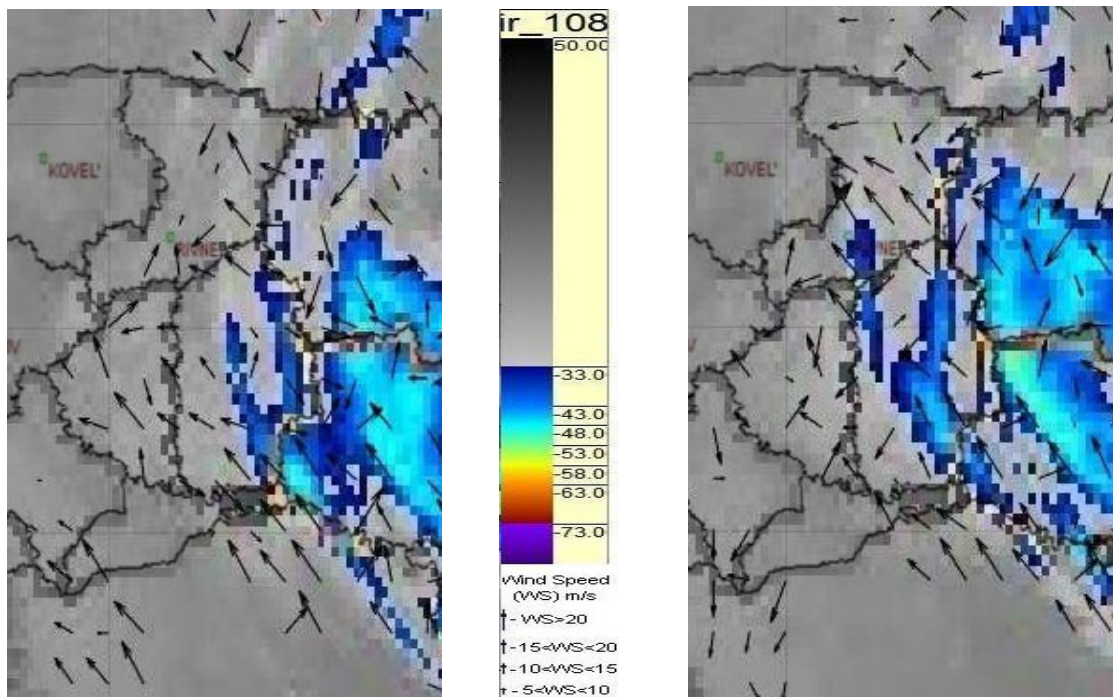


Рис. 6 - Супутникові зображення з нанесеними векторами напрямку і швидкості вітру з модулем відстеження 4x4 пікселів та інтервалом у часі в 1 годину

Fig.6 - Satellite images with applied vectors of wind direction and speed with 4x4 pixel tracking module and time interval of 1 hour

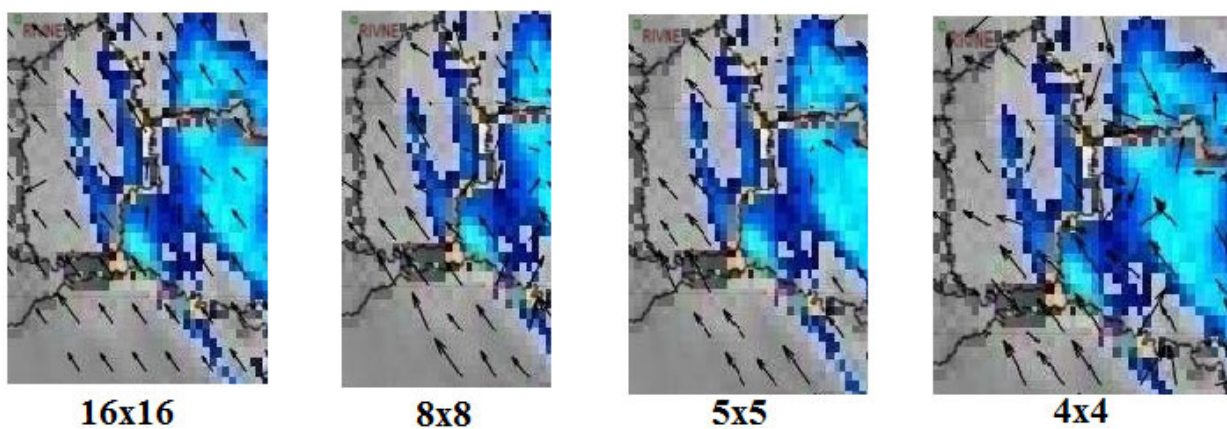


Рис. 7 - Порівняння алгоритмів для частини зображення
Fig. 7 - Comparison of algorithms for part of the image

визначено, що розмір матриці відстеження впливає, як на визначення хмарної зони, так і на визначення напрямку і швидкості руху хмарності.

При аналізі визначення напрямку руху хмарності виявлено, що при температурі верхньої межі хмарності близької до порогового значення (-20°C) алгоритм з модулем відстеження 4×4 пікселя є незадовільним. Алгоритм з модулем відстеження 5×5 пікселів визначає напрям вітру достовірно відносно реального переміщення хмарних мас, є проблема з визначенням хмарності близько до порогового значення. Алгоритм з модулем відстеження 8×8 пікселів визначає напрям вітру достовірно, але є більш придатним для використання на більшій території або з більшим інтервалом між зображеннями (1 год). Алгоритм з модулем відстеження 16×16 пікселів визначає напрям вітру достовірно, але має значну проблему з визначенням хмарності близько до порогового значення, а також спостерігається незначне зменшення швидкості руху хмарності у порівнянні з іншими модулями відстеження.

Приймаючи до уваги все вищесказане можна прийти до висновку, що для території України найбільш оптимальним є алгоритм з модулем відстеження 5×5 пікселів та цільовим модулем 50×50 пікселів при аналізі зображень з інтервалом у часі 15 хвилин. Алгоритми з розміром модуля відстеження 8×8 і 16×16 пікселів актуальні для більшої території, для зображень з кращою роздільною здатністю, або більшим інтервалом часу між супутниковими зображеннями. Алгоритм з модулем відстеження 4×4 пікселя більш придатний для роботи з невеликими, точно вираженими хмарними масами або меншою територією.

5. ПОРІВНЯННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ З ДАНИМИ ПРОГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Було проведено порівняння результатів роботи алгоритму з модулем відстеження 5×5 пікселів з даними прогностичних моделей ICON та GFS [7,8]. Для прикладу на рис. 8а) наведено результати алгоритму за 12.07.2017 12.00, на рис. 8 б,в) наведено дані хмарного покриття у відсотках моделей ICON та GFS, на рис. 8 г,д) – дані напрямку та швидкості вітру за прогностичними моделями ICON та GFS (візуалізація даних моделей взята з сайту <https://www.ventusky.com>).

Порівняння результатів роботи алгоритму не виконувалося з даними радіозондування, оскільки радіозондування проводиться 1-2 рази на до-

бу на 5 станціях по всій території України [19], що є недостатнім для отримання переконливих висновків.

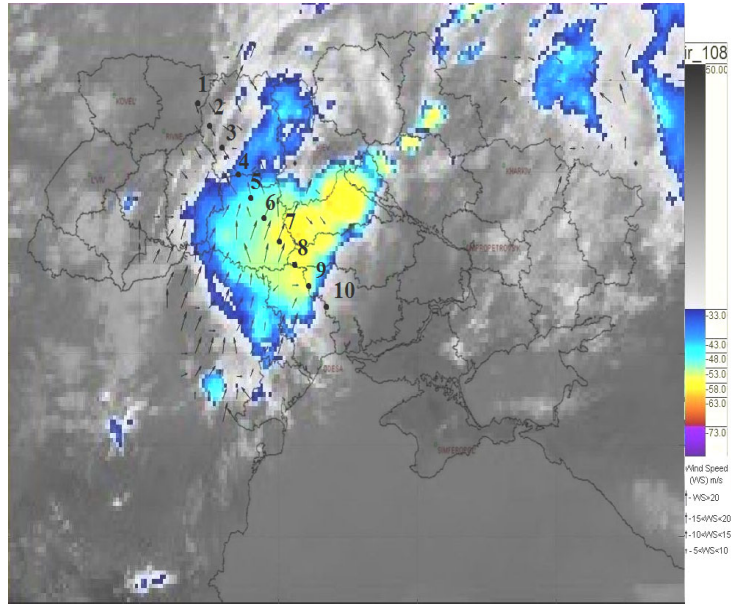
Окремо проводився аналіз прогностичної моделі ICON для території України. Для порівняння використовувалися дані 155 метеорологічних та 12 станцій грозопеленгації по всій території України. Аналіз швидкості вітру 10 м над поверхнею Землі показав середню абсолютну похибку за добу < 1 м/с ($\approx 0,7$ м/с). Аналіз полів хмарності (для хмар з грозовою активністю) виявив недостатню географічну (сотні кілометрів) або часову (декілька годин) точність прогнозу моделі ICON.

У табл. 2 наведено результати порівняння роботи алгоритму з даними прогностичних моделей ICON та GFS для 10 точок вказаних на рис. 8. Вектори швидкості та напрямку вітру можуть бути нанесені на безхмарну область зображення (точки 1-3) або хмарна область може не мати нанесених векторів швидкості та напрямку вітру (точки 8-10). Це обумовлено тим що для роботи алгоритму використовувалися зображення з різницею у часі в 1 годину і швидкість та напрям руху хмарності розраховується для першого зображення і накладається на друге зображення для прогнозу руху останніх доступних хмарних мас. Для покращення точності прогнозу та карти руху повітряних мас слід використовувати супутникові зображення з меншою різницею у часі (15 хвилин).

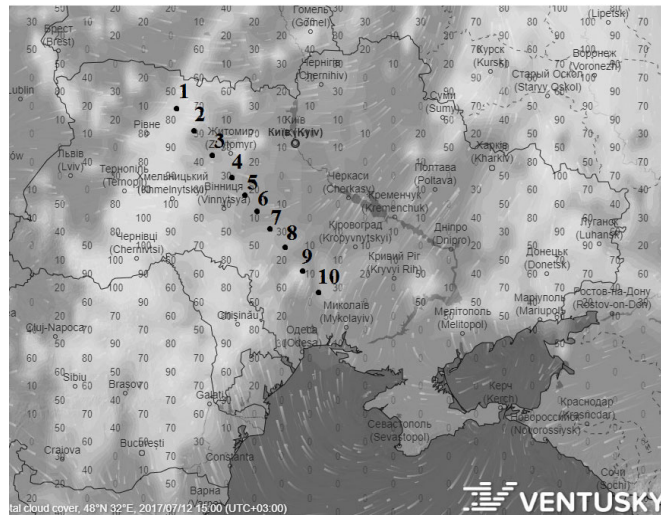
Враховуючи вищесказане, а також аналізуючи порівняння результатів роботи алгоритму з даними прогностичних моделей ICON та GFS можна зробити декілька висновків:

Чисельний прогноз швидкості вітру, для території України, моделей ICON та GFS більш фізично обґрунтований за швидкість вітру отриману у результаті роботи алгоритму, оскільки алгоритм визначає швидкість вітру за переміщенням хмарних мас на послідовних супутникових зображеннях, а прогностичні моделі при розрахунках приймають до уваги декілька факторів (поля тиску, розвиток і подальшу еволюцію циклонів, антициклонів, географічні характеристики місцевості та ін.), що робить їх більш реалістичними;

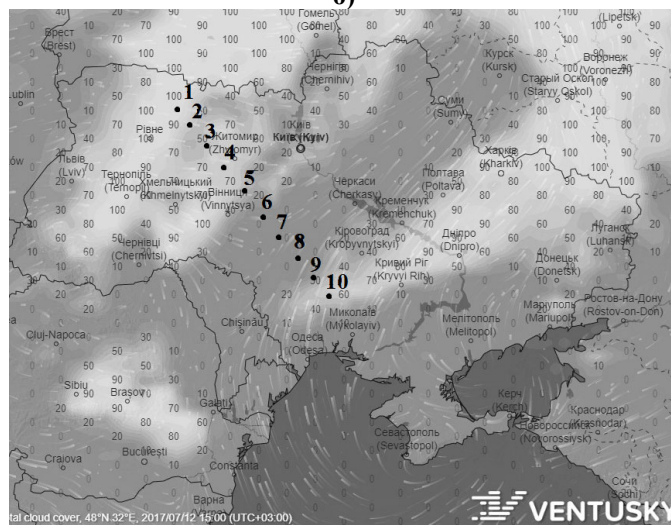
Напрямок руху повітряних мас (напрямок вітру) за результатами роботи алгоритму виявився більш надійним ніж дані прогностичних моделей. Це пов'язано з тим що алгоритм для роботи використовує послідовні супутникові зображення і аналізує переміщення повітряних мас в реальному часі, в той час як прогностичні моделі



а)

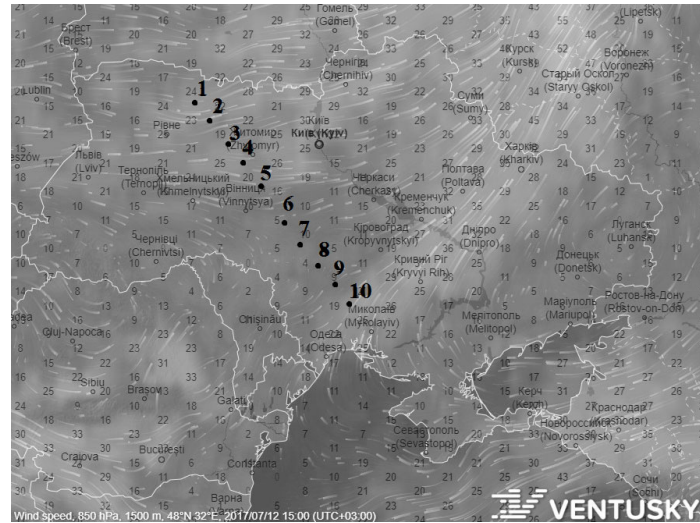


б)

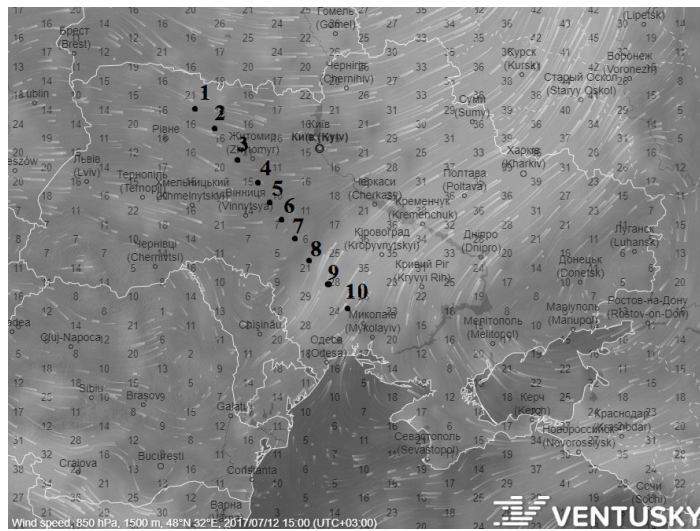


в)

Рис. 8 - Порівняння роботи алгоритму (а) з даними прогнозаційних моделей ICON (б,г) та GFS (в,д) за 12.07.2017 12.00
 Fig. 8 - Comparison of the algorithm (a) with the data of forecast models ICON (b, d) and GFS (c, d) for 07/12/2017 12.00



г)



д)

Рис. 8 – Продовження
Fig. 8 – Continued

Таблиця 2 - Результати порівняння роботи алгоритму з даними прогностичних моделей
Table 2 - The results of comparing the algorithm with the data of forecast models

№	Хмарність			Напрямок вітру			Швидкість вітру		
	Алгоритм	ICON	GFS	Алгоритм	ICON	GFS	Алгоритм	ICON	GFS
1	-	>-33 °C	-40 °C	Пн.-Зх.	Зх.	Зх.	9 м/с	9 м/с	8 м/с
2	>-33 °C	>-33 °C	>-33 °C	Пн.-Зх.	Зх.	Зх.	11 м/с	12 м/с	8 м/с
3	>-33 °C	-	>-33 °C	Пн.-Зх.	Зх.	Зх.	10 м/с	10 м/с	11 м/с
4	-40 °C	-	>-33 °C	Пд.-Сх.	Зх.	Зх.	9 м/с	11 м/с	12 м/с
5	-44 °C	-	>-33 °C	Пд.	Зх.	Пд.-Зх.	13 м/с	14 м/с	15 м/с
6	-55 °C	-	-	Пд.-Зх.	Зх.	Пд.-Зх.	16 м/с	17 м/с	19 м/с
7	-53 °C	-	-	Пд.-Зх.	Зх.	Пд.-Зх.	18 м/с	15 м/с	17 м/с
8	-50 °C	-	-	-	Зх.	Пд.-Зх.	-	15 м/с	18 м/с
9	-40 °C	>-33 °C	>-33 °C	-	Зх.	Пд.-Зх.	-	14 м/с	16 м/с
10	>-33 °C	>-33 °C	>-33 °C	-	Зх.	Пд.-Зх.	-	14 м/с	15 м/с

розраховують утворення і переміщення повітряних мас завчасно (з інтервалом у часі від декількох годин до десятків годин). Це добре видно на рис. 8б та рис. 8в де моделі ICON та GFS спрогнозували хмарність з похибкою у північному (ICON) та західному (GFS) напрямках відносно хмарності на супутниковому зображенні (рис. 8а).

Для визначення і прогнозу напрямку руху хмарних мас над територією України доцільніше використовувати алгоритм визначення напрямку та швидкості вітру за супутниковими зображеннями. Хмарні маси визначаються найточніше за супутниковими зображеннями, що є особливо важливим для виявлення і прогнозу небезпечних стихійних погодних явищ.

6. ВИСНОВКИ

Стаття описала весь процес обчислення векторів руху вітру. Метод є простим, швидким і легким у реалізації і сприйнятті. Використовуючи супутникові дані було створено інтуїтивно зрозумілу мапу руху повітряних мас над територією України інтервалом 15 хвилин. Було проведено порівняння різних розмірів модуля відстеження та цільового модуля для території України і визначені оптимальні варіанти для різних умов. Виявлені переваги та недоліки алгоритму відносно прогнозних моделей ICON та GFS.

Робота була проведена у програмному середовищі MATLAB з використанням даних геостационарного супутника MSG-3, отриманих системою прийому метеорологічної інформації, що встановлено в УкрГМІ. Алгоритм працює надійно, результатом його роботи є карта руху повітряних мас, що відображає напрям і швидкість вітру над територією України. Вона може використовуватися для короткострокового прогнозу погоди та виявлення і прогнозування подальшого розвитку небезпечних стихійних погодних явищ. У подальшому планується інтеграція з системою грозопеленгації для точнішого прогнозування розвитку особливо небезпечних погодних явищ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Thies B., Bendix J. Satellite based remote sensing of weather and climate: recent achievements and future perspectives. Department of Geography, Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Philipps-University. Marburg, 2011.
- Кривобок А. А. Новые возможности приема цифровой спутниковой информации через систему EUMETCast. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2008. №3. С. 25–32. с.
- Meteosat second generation becomes operational. directorate of Earth observation / Schumann W., Oremus R., Rota S., Kerkmann J. *Esa bulletin*. EUMETSAT. Darmstadt, 2004. Vol. 119. Pp 14-21
- Kryvobok O., Kulbida M., Savchenko L. Monitoring severe weather in Ukraine with satellite data, use of satellite and in-situ data to improve sustainability. *Springer Science+Business Media B.V.* 2010. Pp. 42-48.
- Just D. SEVIRI instrument Level 1.5 data. *First MSG RAO Workshop*, held 17-19 May, at CNR, Bologna, Italy / Edited by R.A. Harris. European Space Agency ESASP-452, 2000. P. 29.
- Jan Kaňák. New possibilities for access and utilisation of EUMETSAT data and products through DAWBEE programme. *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, 5-9 September. Oslo, Norway, 2011.
- The ICON (ICOSahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core / Zangl G, Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2016. Vol. 141(687). Pp. 563-579.
- Teague K. A., Gallicchio N. The rise of modern computer models, the evolution of meteorology: a look into the past, present and future of weather forecasting. Ch. 8, 2017.
- McClung T. Technical Implementation Notice 16-11 Amended. *Nation Weather Service*. Archived from the original on 5 June 2016.
- Izawa T., Fujita T. Relationship between winds and cloud velocities determined from pictures obtained by the ESSA 3, ESSA 5 and AST-I Satellites. *North-Holland Publishing Co., Space Research IX*, Amsterdam, 1969. Pp. 571-579.
- Hubert L. F., Whitney L. F. Wind estimation from geostationary-satellite picture. *Monthly Weather Review*. 1971. Vol. 99(9). Pp. 665-672.
- Use of a pattern recognition technique for determining cloud motions from sequences of satellite photographs / Endlich R. M., Wolf D. E., Hall D. J., Brain A. E. *Journal of Applied Meteorology*. 1971. Vol. 10(1). Pp. 105-117.
- Wolf D. E., Hall D. J., Endlich R. M. Experiments in automatic cloud tracking using SMS-GOES data. *Journal of Applied Meteorology*. 1977. Vol. 16(11). Pp. 1219-1230.
- Lou T., Lin L., Zhan N. Discussion measurement models and algorithms of the wind vector field based on satellite images. Published online. 2013. #4. Pp. 122-126.
- Smith E. A. The McIDAS system. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*. 1975. Vol. 13(3). Pp. 123- 136.
- Zhang Q. S. Method of static meteorological satellite cloud image Landmark navigation China Academic Journal Electronic Publishing House, Beijing, 1984.
- Bedka K. Objective satellite-based overshooting top and enhanced-v signature detection, science systems and applications, Inc. (SSAI) at the NASA Langley Research Center.
- Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalysis, and observations: Decadal changes, / Santer B. D., Sausen R, Wigley T. M. L. et al. *Journal of Geophysical Research*. January 2003. Vol. 108(D1).
- Стан мережі спостереження за атмосферним повітрям в Україні та її відповідність вимогам директиви / Дмитрієва О. О., Варламов С. М., Квасов В. А., Палагута О. А. 2008/50/EC

REFERENCES

- Thies, B. & Bendix, J. (2011). *Satellite based remote sensing of weather and climate: recent achievements and future perspectives*. Department of Geography, Laboratory for Climatology and Remote Sensing, Philipps-University. Marburg.
- Krivobok, A.A. (2008). *Novye vozmozhnosti priema tsifrovoy sputnikovoy informatsii cherez sistemu EUMETCast*. [New possibilities for receiving digital satellite information through the EUMETCast system.] *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 3, pp. 25–32. (in Russ)
- Schumann, W., Oremus, R., Rota, S. & Kerkmann, J. (2004). *Meteosat Second Generation Becomes Operational*. Directorate of Earth Observation. Esa bulletin, vol. 119, EUMETSAT. Darmstadt.
- Kryvobok, O., Kulbida, M. & Savchenko, L. (2010). Monitoring Severe Weather in UKRAINE with Satellite Data, Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability. *Springer Science+Business Media B.V.*, pp. 42-48.
- Just, D. (2000). SEVIRI instrument Level 1.5 data. In: Harris R.A. (ed.) *First MSG RAO Workshop*, held 17-19 May, 2000, at CNR, Bologna, Italy. European Space Agency ESASP-452, p.29
- Jan, Kaňák (2011). New possibilities for access and utilisation of EUMETSAT data and products through DAWBEE programme. *Conference: EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, Oslo, Norway
- Zangl, G., Reinert, D., Ripodas, P. & Baldauf M. (2016). The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(687), pp. 563-579.
- Teague, K.A. & Gallicchio, N. (2017). *The Rise of Modern Computer Models, The Evolution of Meteorology: A Look into the Past, Present and Future of Weather forecasting*. Ch. .
- McClung, T. (2016). *Technical Implementation Notice 16-11 Amended*. Nation Weather Service.
- Izawa, T. & Fujita, T. (1969). Relationship between Winds and Cloud Velocities Determined from Pictures Obtained by the ESSA 3, ESSA 5 and AST-I Satellites. *North-Holland Publishing Co., Space Research IX*, Amsterdam, pp. 571-579.
- Hubert, L.F. & Whitney, L.F. (1971). Wind Estimation from Geostationary-Satellite Picture. *Monthly Weather Review*, 99(9), pp. 665-672.
- Endlich, R.M., Wolf, D.E., Hall, D.J. & Brain, A.E. (1971). Use of a Pattern Recognition Technique for Determining Cloud Motions from Sequences of Satellite Photographs. *Journal of Applied Meteorology*, 10(1), pp. 105-117.
- Wolf, D.E., Hall, D.J. & Endlich, R.M. (1977). Experiments in Automatic Cloud Tracking Using SMS-GOES Data. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 16, No. 11, pp. 1219-1230
- Lou, T., Lin, L. & Zhan, N. (2013). *Discussion Measurement Models and Algorithms of the Wind Vector Field Based on Satellite Images*. Published Online, 4, pp. 122-126.
- Smith, E.A. (1975). The McIDAS System. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 13(3), pp. 123-136.
- Zhang, Q.S. (1984). *Method of Static Meteorological Satellite Cloud Image Landmark Navigation*. China Academic Journal Electronic Publishing House, Beijing.
- Bedka, K. *Objective Satellite-Based Overshooting Top and Enhanced-V Signature Detection*, Science Systems and Applications, Inc. (SSAI) at the NASA Langley Research Center
- Santer, B.D., Sausen R, Wigley, T.M.L et al. (2003). Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalysis, and observations: Decadal changes. *Journal of Geophysical Research*, 108(D1).
- Dmytriieva, O.O., Varlamov, Ye.M., Kvasov, V.A. & Palahuta, O.A. (2008). *Stan merezhi sposterezhenia za atmosferynym povitriam v ukraini ta yii vidpovidnist vymoham dyrektyvy 2008/50/IeS [Condition of the air monitoring network in Ukraine and its compliance with the requirements of Directive 2008/50 / EC]*

IDENTIFICATION OF WIND DIRECTION AND SPEED USING THE SATELLITE IMAGES FOR THE TERRITORY OF UKRAINE

M. M. Koman

Ukrainian Hydrometeorological Institute,
37, Nauki St., 03028 Kyiv, Ukraine, mishakoman@gmail.com

The purpose of this article is to identify the wind direction and speed using the images from geostationary satellites and through application of two-dimensional wind vectors, the magnitude and direction of which corresponds to the speed and direction of cloud masses, on a satellite image. The results may be used for making a short-term forecast of dangerous weather events within the territory of Ukraine.

To make the technique work, it is necessary to select cloud areas on a satellite image using the threshold method. Then, based on the brightness temperature distribution between two tracking modules (parts of an image based on which two consecutive satellite images are compared), the maximum correlation coefficient for infrared brightness temperature is to be determined. The coefficient corresponds to the movement of cloud masses and sets the beginning and end of the wind direction vector.

To determine the optimum application of the technique for the territory of Ukraine, the analysis of accuracy of tracking modules of different sizes was also performed. The analysis

revealed that the accuracy of determining the wind vector direction depends on the tracking module size: the larger it is, the more accurate is the direction vector found, but given that the time interval between images is 15 minutes, the optimum algorithm to be used in Ukraine is the one with 5x5 pixel tracking module.

The technique performance was also compared with the data of ICON and GFS forecast models. The results of the applied algorithm showed that the direction of air masses was more reliable than the data retrieved from the above-mentioned forecast models, because the algorithm analyzes the real-time movement of air masses while the forecast models assess the formation and movement of air masses in advance (with an interval of several hours up to dozens of hours). Numerical wind speed forecast of ICON and GFS models is more accurate, because the algorithm determines the wind speed based on the movement of cloud masses on satellite images whereas the forecast models consider several factors (pressure fields, development and subsequent evolution of cyclones, anticyclones, geographical characteristics etc.) which makes them more realistic.

Keywords: satellite images, correlation coefficient, wind direction, wind speed

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ ВЕТРА ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

М. М. Коман

Украинский гидрометеорологический институт,
пр-т Науки, 37, 03028, Киев, Украина, mishakoman@gmail.com

Целью данной статьи является определение направления и скорости ветра на снимках с геостационарных спутников и нанесение двумерных ветровых векторов, величина и направление которых соответствует скорости и направлению движения облачных масс, на спутниковое изображение для применения в системе краткосрочного прогноза опасных погодных явлений для территории Украины.

Для работы методики необходимо выделить облачные области на спутниковом изображении, используя пороговый метод. После чего на основе особенности распределения температуры яркости между двумя модулями отслеживания (части изображения между которыми проводится сравнение двух последовательных спутниковых изображений) определяется максимальный коэффициент корреляции для инфракрасной температуры яркости, что соответствует перемещению облачных масс и устанавливает начало и конец вектора направления ветра.

Для определения оптимального применения методики для территории Украины проведен анализ точности между различными размерами модулей отслеживания. При анализе было выявлено, что точность определения направления вектора ветра зависит от размера модуля отслеживания, чем больше модуль отслеживания, тем точнее определяется направление вектора, но учитывая временной интервал между изображениями в 15 минут оптимальным для применения на территории Украины является алгоритм с модулем отслеживания 5x5 пикселей

Также проведено сравнение работы методики с данным прогностических моделей ICON и GFS. Направление движения воздушных масс по результатам работы алгоритма оказалось более надежным чем данные прогностических моделей, поскольку алгоритм анализирует перемещение воздушных масс в реальном времени, в то время как прогностические модели рассчитывают образования и перемещения воздушных масс заблаговременно (с интервалом во времени от нескольких часов до десятков часов). Численный прогноз скорости ветра моделей ICON и GFS является более точным, поскольку алгоритм определяет скорость ветра по перемещению облачных масс на спутниковых изображениях, а прогностические модели при расчетах принимают во внимание несколько факторов (поля давления, развитие и дальнейшую эволюцию циклонов, антициклонов, географические характеристики местности и др.), что делает их более реалистичными.

Ключевые слова: спутниковые изображения, коэффициент корреляции, направление ветра, скорость ветра.

Подання до редакції : 28. 08. 2020
Надходження остаточної версії : 01. 12. 2020
Публікація статті : 17. 12. 2020

УДК 551.582

СУЧАСНА ДИНАМІКА ПОКАЗНИКІВ ОСНОВНИХ КЛІМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА СТАНЦІЯХ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я

Е. М. Серга, В. М. Хохлов, Л. В. Недострелова

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
Serga_ed@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6470-8540>

Метою дослідження є визначення статистичних оцінок розподілів середньомісячних та річних температур і місячних та річних сум опадів, як основних кліматичних характеристик, для Північно-Західного Причорномор'я в епоху інтенсифікації кліматичних змін. Проаналізовані параметри нормального розподілу для температури та дво- і трипараметричного гамма-розподілу для опадів, а також трендові характеристики. Для визначення відхилення значень від попереднього кліматичного періоду використовувались дані Кліматичного кадастру України (1961–1990 роки).

Результати статистичного аналізу показують, що протягом періоду 2000–2018 років спостерігається стала тенденція до зростання річних температур повітря на усіх розглянутих станціях. У часовому ході цих характеристик простежується чіткий поділ на два періоди з точкою переходу у 2007 році. Середні за період місячні температури повітря у цілому перевищують аналогічні значення за 1961–1990 роки; особливо явно це простежується для літніх місяців.

Часові розподіли місячних сум опадів не мають однорідності у просторі. Визначено, що в Одесі, на відміну від інших станцій, де максимальна кількість опадів припадає на літні місяці, максимуми спостерігаються у січні, липні й вересні. Крім того, на станції Одеса суми опадів у більшості місяців перевищують аналогічні значення за 1961–1990 роки. Річні суми опадів протягом 2000–2018 років мають низку закономірностей і відмінностей, серед яких загальною рисою є наявність максимальних значень у 2010 р. Відповідно до загальноперіодних трендових характеристик визначено, що тільки на найпівденнішій станції (Ізмаїл) існує тенденція до збільшення річної кількості опадів, яка добре простежується, починаючи з 2009 р., але їхні середньостатистичні значення (так само, як і на станціях Любашівка та Миколаїв) менші за наведені у Кліматичному кадастрі України. Навпаки, на станціях, розташованих на узбережжі (Одеса, Очаків), спостерігається перевищення аналогічних значень.

Грунтуючись на зробленому аналізі, можна зробити висновок про те, що усі сталі тенденції до змін значень розглянутих кліматичних характеристик пов'язані з можливими змінами циркуляційних процесів в атмосфері над розглянутою територією.

Ключові слова: середньомісячна температура, річна температура, місячна сума опадів, річна сума опадів, гамма-розподіл, ексцес, асиметрія.

1. ВСТУП

В останні десятиріччя минулого століття проблема зміни глобального клімату у бік його потепління привернула увагу на необхідність розуміння клімату Землі як головної частини глобальної системи взаємодіючих процесів з включенням усіх основних компонентів системи Земля. Проте, треба відзначити, що перші ознаки зміни глобальної температури в ХХ-му сторіччі спостерігалися ще у 1910–1940 роках з найбільшим проявом у Арктиці [1]. Крім того, якщо період, починаючи з 1980-х років, головним чинником підвищення температури має додатковий парниковий ефект, створений антропогенними емісіями парникових газів, то жодна гіпотеза причин потепління на початку ХХ-го сторіччя

(сонячна радіація, довгоперіодні коливання у системі атмосфера-океан тощо) не є загальновищезаною.

Незважаючи на деякі відмінності у визначенні змін клімату у документах Міжурядової групи експертів з питань змін клімату та Рамочної конвенції ООН зі змін клімату, де у перших під цим поняттям розуміють будь які істотні варіації середнього стану (або його мінливості) природного або антропогенного походження, а у других тільки антропогенного, в обох випадках під мінливістю клімату розуміють варіації середнього стану й інших статистичних характеристик клімату, а саме середні значення, дисперсія, екстремальні значення, кількість екстремальних подій тощо.

В останні роки велика увага приділяється дослідженню локальних (регіональних) кліматів, в першу чергу тому, що за загальної зміни основних кліматичних характеристик (індикаторів) (наприклад, підвищенні температури повітря, зміни кількості опадів) тенденції цих змін є неоднозначними, особливо по різних регіонах [2]. Це є наслідком відмінностей у неоднорідностях проявів впливу кліматоутворюючих факторів, як внутрішніх так й зовнішніх, а також у просторових розподілах підстильної поверхні та концентрацій газових сумішей в атмосфері [3–6].

Зазначені неоднозначності регіональних кліматичних змін потребують постійного контролю, уточнення та аналізування для подальшого вивчення й прогнозування наслідків їхнього можливого впливу на життєдіяльність людей та навколишнє середовище. Як матеріал дослідження, у більшості випадків, використовуються стандартні статистичні показники мінливості клімату, які відрізняються від глобальних кліматичних меншими часовими масштабами.

Серед основних індикаторів кліматичних змін частіше розглядають статистичний опис коливань температури та опадів, які є найважливішими компонентами клімату [7]. Мінливість цих характеристик є унікальною для різних регіонів Земної кулі і пояснюється, головним чином, особливостями взаємодій в системі атмосфера-підстильна поверхня [8, 9], а у теперішній час перевищення нею історичного діапазону є все частішим [10, 11]. Крім того, не зважаючи на те, що зв'язок змін глобальної температури з іншими кліматичними величинами [12] і змінами кількості та інтенсивності екстремальних кліматичних явищ [13–15] є одночасним, поки ще не є зрозумілим, яка частина їх припадає на вимушену, а яка на внутрішню мінливість клімату [16, 17]. Також треба враховувати можливі варіації процесів внутрішньої кліматичної мінливості на менших просторових та часових масштабах під впливом змін глобальної температури [18, 19].

Вирішення таких завдань потребує вдосконалення статистичних оцінок розподілів регіональних кліматичних індикаторів з метою встановлення знаків трендових складових, визначення особливостей кількісних показників на часовому та просторовому масштабах. *Метою цього дослідження є визначення статистичних оцінок розподілів середньомісячних та річних температур і місячних та річних сум опадів для деяких метеорологічних станцій півдня України.*

2. ВИХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Для визначення реакції регіональних кліматів України на фактори, які визначають глобальне потепління, були обрані 5 метеорологічних станцій у двох південних її областях: Одеській (Ізмаїл, Любашівка, Одеса) та Миколаївській (Миколаїв, Очаків), які відбивають основні особливості часових розподілів метеорологічних величин на узбережжі та певній відстані від моря. Як досліджувані кліматичні характеристики використовувалися дані середніх місячних значень температури повітря і місячних сум опадів за 19-річний період, з 2000 по 2018 роки. Порівняльний аналіз здійснювався з аналогічними даними Кліматичного кадастру України за 1961–1990 роки (далі – Кадастр).

При дослідженні розподілу середніх місячних температур повітря і кількості опадів у вибраному регіоні за період з 2000 по 2018 рр. використовувалися стандартні статистичні методи обробки гідрометеорологічної і кліматичної інформації [20–24]. Виходячи з досвіду застосування показників розподілу кліматичних характеристик (температури повітря, опадів), були взяті за основу параметри розподілів нормального (для температури) і гамма (для опадів) [25–30].

Для нормального розподілу:

$$- \text{середнє вибіркоче } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ;$$

- дисперсія і середньоквадратичне (стандартне) відхилення

$$D_x = S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 ,$$

$$\sigma_x = S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} ;$$

$$- \text{асиметрія } As = \frac{m_3}{\sigma_x^3}, m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 ;$$

$$- \text{ексцес } Ex = \frac{m_4}{\sigma_x^4} - 3, \text{ де } m_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 .$$

Гамма-розподіл є узагальненням експоненціального розподілу і являє собою сімейство розподілів, яке залежить від значень параметрів (експоненціальне, Ерланга, χ^2 тощо). Його застосовують, якщо змінна є додатною і необмеженою за величиною. Серед параметрів, які визначають вид гамма-розподілу, найчастіше використовують λ – параметр форми і α – параметр масштабу, але для найбільш точної оцінки розраховують ще й третій параметр c – зсув.

Треба відзначити, що згідно з центральною

граничною теоремою теорії ймовірностей при великих значеннях λ (параметра форми) гамма-розподіл може бути наближений нормальним законом розподілу. Вирази для розрахунку основних параметрів та характеристик розподілу, які визначені методом моментів, мають такий вигляд.

1. Вибіркові:

$$- \text{середнє значення } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ;$$

- дисперсія і середньоквадратичне (стандартне) відхилення

$$D_x = S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 ,$$

$$\sigma_x = S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} .$$

2. У разі використання трьох параметрів:

$$- \text{параметр форми } \lambda = 4 \frac{S_x^6}{m_3^2}, m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 ;$$

$$- \text{параметр масштабу } \alpha = \frac{1}{2} \frac{m_3}{S_x^2} ;$$

$$- \text{зсув } c = \bar{x} - \lambda \alpha ;$$

- математичне сподівання (середнє значення) $M(x) = \lambda \alpha + c ;$

$$- \text{асиметрія } As_g = \frac{2}{\sqrt{\lambda}} ;$$

$$- \text{ексцес } Ex_g = \frac{6}{\lambda} .$$

3. У разі використання двох параметрів:

$$- \text{параметр форми } \lambda = \frac{(\bar{x})^2}{S_x^2} ;$$

$$- \text{параметр масштабу } \alpha = \frac{S_x^2}{\bar{x}} ;$$

$$- \text{середнє значення } \bar{x}_g = \lambda \alpha ;$$

$$- \text{дисперсія } D_g = S_g^2 = \lambda \alpha^2 ;$$

$$- \text{мода } Mo = (\lambda - 1) \alpha ,$$

а асиметрія і ексцес визначаються, так само, як і у разі використання трьох параметрів.

3. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Температура повітря. Як було зазначено вище, вхідні дані про температуру повітря представлені середніми місячними значеннями за період з 2000 по 2018 роки, тобто первинна вибірка складала 228 значень. З них додатково були отримані середня річна температура повітря в

період з 2000 по 2018 років і середня місячна багаторічна температура повітря за цей період. Ці ряди й були досліджені та проаналізовані.

Відомо [7], що річна і середня місячна температури повітря, які є одними з основних кліматичних характеристик, формуються під впливом певних зовнішніх і внутрішніх природних кліматоутворюючих чинників, наприклад, сонячної радіації, циркуляції атмосфери, характеру підстильної поверхні, потоків прихованого тепла тощо. Великий вплив має також й антропогенний фактор. Треба також пам'ятати, що середня місячна температура має чітко виражений сезонний хід.

Зміни річної температури повітря в період з 2000 по 2018 рр. для п'яти обраних станцій наведені на рис. 1. На цих рисунках для порівняння наведені також і дані Кадастру: річна температура повітря (\bar{t}_K) та середнє квадратичне відхилення (σ_K).

Як можна побачити, протягом досліджуваного періоду спостерігалася стала тенденція до зростання річних температур повітря на усіх станціях, що підтверджується видом поліноміального тренда другого степеня. Відзначимо, що використання лінії зазначеного тренда зумовлено тим, що вона найкращим чином описує тенденції змін величини, що аналізуються, але використовувати цю криву для апроксимації і згладжування ряду не можна через низьку достовірність коефіцієнта детермінації R^2 .

Також видно, що максимальна температура спостерігалася у 2007 році (Ізмаїл – 12,9 °С, Любашівка – 10,9 °С, Одеса – 12,5 °С, Миколаїв – 12,2 °С, Очаків – 12,1 °С), а мінімальна – у 2003 році (Ізмаїл – 10,7 °С, Любашівка – 8,6 °С, Одеса – 10,1 °С, Миколаїв – 9,7 °С, Очаків – 9,8 °С).

Візуально обраний період можна розділити на дві частини: з 2000 по 2006 рр. і з 2007 р по 2018 рр. У першій частині періоду максимальні температури перебували в межах середнього значення, а в другій частині значно перевищували його. Ще однією особливістю є те, що розташування пікових значень температури в другій частині практично не виходило за інтервал $\bar{t} + \sigma$ (за винятком максимуму у 2007 році). Що стосується мінімальних значень, то вони у першій частині не виходили за межі інтервалу 2σ (за винятком мінімуму у 2003 році). Порівнюючи з аналогічними даними Кадастру, можна зробити висновок про абсолютну неоднорідність двох вибірок як за середнім значенням, так і за інтервалами розташування варіацій значень, з переважанням у бік значного зростання температури в аналізованому періоді.

* Треба відзначити, що при від'ємному m_3 (третьому моменті) величина не підлягає гамма-розподілу.

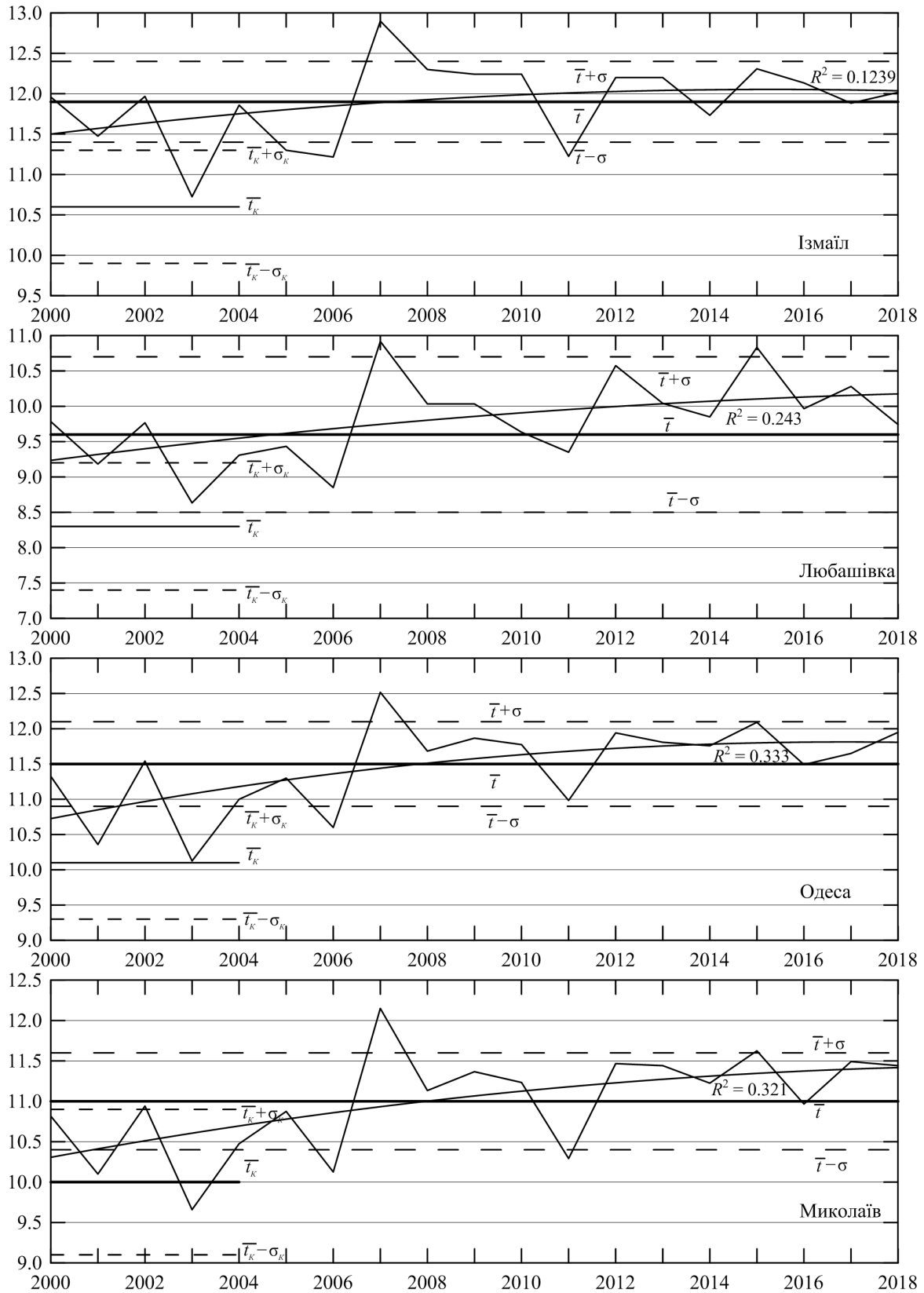


Рис. 1 – Середня річна температура повітря (°C) протягом 2000–2018 років на метеорологічних станціях Ізмаїл, Любашівка, Одеса, Миколаїв та Очаків порівняно з даними Кадастру. Також показані середні за зазначений період та середні квадратичні відхилення, а також лінія поліноміального тренда другого степеня
Fig. 1 – Annual air temperature (°C) for 2000–2018 at meteorological sites Izmail, Lyubashivka, Odessa, Mykolaiv, Ochakiv compared with Cadastre data. Long-term annual means, standard deviations, and second-degree polynomial trend line are also presented

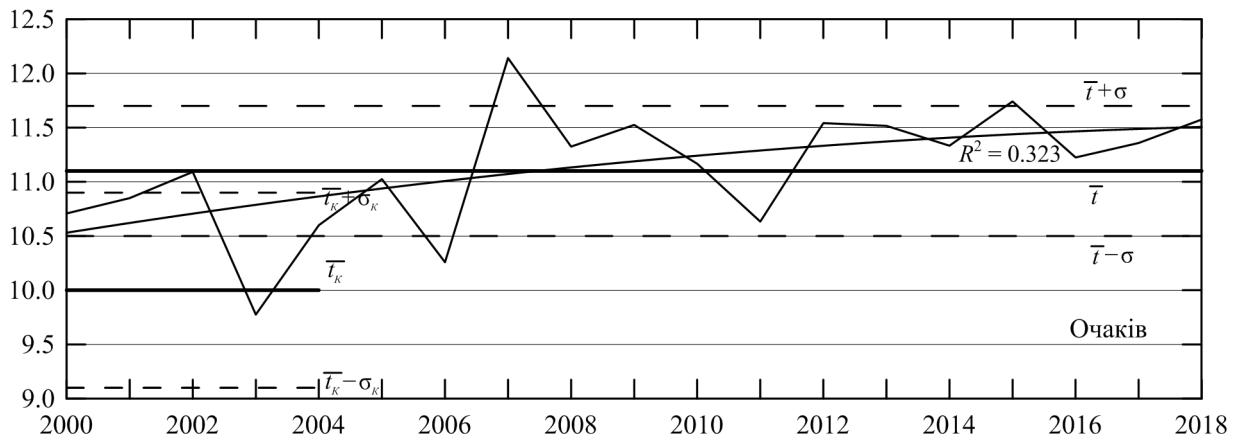


Рис. 1 – Продовження
Fig. 1 – Continued

Таблиця 1 – Статистичні характеристики (параметри нормального закону розподілу) температури повітря за період 2000–2018 років у порівнянні з даними Кадастру

Table 1 – Statistical characteristics (normal distribution parameters) of air temperature for 2000–2018 compared with Cadastre data

№ п/п	Найменування станції	Період 2000–2018 років				Дані Кадастру	
		\bar{t} , °C	σ , °C	Ex	As	\bar{t}_K , °C	σ_K , °C
1	Ізмаїл	11,9	0,51	-0,4	-0,25	10,6	0,7
2	Любашівка	9,8	0,6	0	-0,6	8,3	0,9
3	Одеса	11,5	0,61	-0,6	-0,4	10,1	0,8
4	Миколаїв	11,0	0,6	-0,4	-0,6	10,0	0,9
5	Очаків	11,1	0,6	-0,6	-0,1	10,0	0,9

Параметри розподілу річної температури повітря (ексцес і асиметрія), наведені у табл. 1, мають від'ємні значення, що свідчить про переважання низьких температур у досліджуваному періоді (As) і відносному вирівнюванні ймовірностей (Ex).

На рис. 2 надано річний хід середніх за період 2000–2018 років місячних температур повітря, а також аналогічних величин з Кадастру разом з інтервалом в 1σ .

Взагалі, річний хід температури повітря відповідає річному ходу надходження сонячної радіації. Мінімальна температура відзначається у січні ($-0,7^\circ\text{C}$ в Ізмаїлі, $-5,8^\circ\text{C}$ у Любашівці, $-0,5^\circ\text{C}$ в Одесі, $-2,1^\circ\text{C}$ у Миколаєві та $-1,4^\circ\text{C}$ в Очакові), а максимальна – в липні-серпні ($23,9\text{--}23,8^\circ\text{C}$ в Ізмаїлі, $22,7\text{--}21,8^\circ\text{C}$ у Любашівці, $23,6\text{--}23,6^\circ\text{C}$ в Одесі, $23,9\text{--}23,8^\circ\text{C}$ у Миколаєві та $23,7\text{--}23,6^\circ\text{C}$ в Очакові, відповідно). На всіх п'яти станціях мають місце місяці зі значеннями температури, які перевищують межі інтервалу $\bar{t}_K + \sigma_K$ у бік зростання. Так, на станції Ізмаїл така ситуація спостерігається в літні місяці (червень, липень, серпень) і у вересні, на станціях Любашівка, Миколаїв і Очаків – тільки в червні, липні, в Одесі – травні, червні та липні. Проте

усі вони (значення) перебувають в межах двох ймовірних відхилень (2σ). Також потрібно відзначити, що крива річного ходу середніх температур у всіх випадках розташовується вище кривої подібних температур зазначених в Кадастрі, що може бути підтвердженням кліматичних змін в бік потепління.

Опади. Атмосферні опади, так само як і температура, є однією з основних характеристик клімату, і багато в чому залежать від синоптичної ситуації та місцевих умов. Останні, багато в чому визначають кількість опадів у теплу пору року.

Розподіл річних сум опадів показаний на рис. 3. Порівняння графіків дозволяє виявити деякі загальні закономірності й відмінності. Так, загальним була наявність максимального піку у 2010 р. зі значеннями на станції Ізмаїл 676,2 мм, Любашівка 660,1 мм, Одеса 708,8 мм, Миколаїв 653,4 мм. Аналогічні максимум, але дещо з меншими значеннями, мали місце у 2014 р. і 2016 р. На станції Очаків максимум 653,3 мм спостерігався у 2004 р., а другий екстремум 585,8 мм – у 2010 р. Відмінностями у розподілі сум опадів є:

1. Мінімум річної суми опадів у 2011 року на станції Ізмаїл (291,9 мм) збігається з відносно

малими значеннями (істотно меншими за середнє значення, але не мінімальними) на станціях Одеса (392,7 мм) і Миколаїв (307,8 мм). Але у Любашівці в цей рік спостерігалася кількість опадів, близька до середнього за аналізований період. Екстремальні мінімальні значення на цих трьох станціях реєструвалися у 2007 році (388,1 мм у Любашівці), 2013 року (351,4 мм в Одесі), 2017 року (257,1 мм у Миколаєві).

2. Мали місце ситуації, коли в одні й ті ж роки великим річним сумах на певних станціях

відповідали малі суми опадів на інших; такими прикладами можуть бути 2005, 2008 і 2013 роки.

3. Відповідно до вигляду формального поліноміального тренда другого степеню тільки в Ізмаїлі спостерігається тенденція до зростання кількості опадів, яка добре виражена з 2009 року. У той же час на станціях Любашівка і Одеса падіння, яке намітилося в першій половині періоду, частково компенсується незначним зростанням в наступні роки.

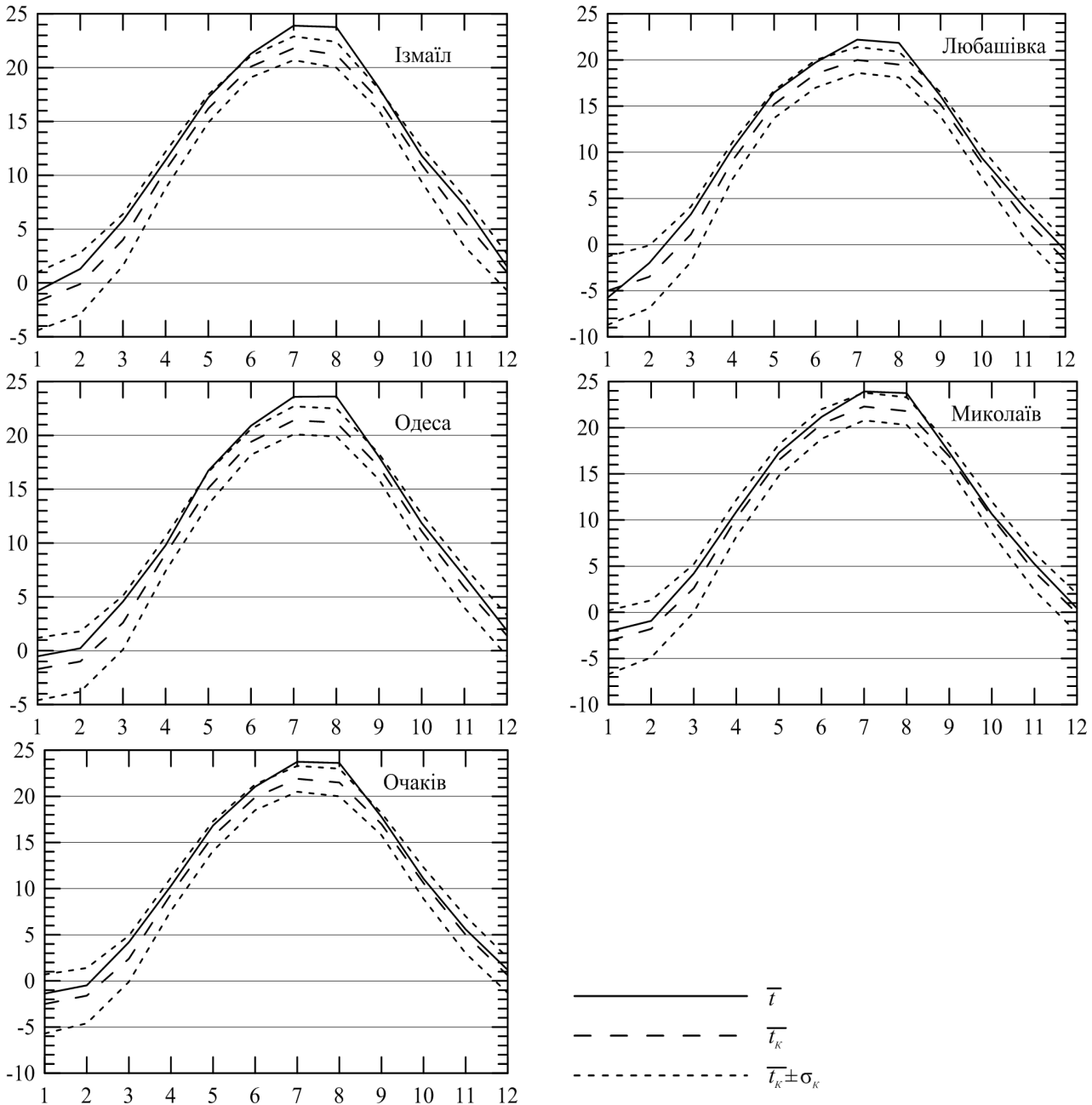


Рис. 2 – Річний хід середньої за період 2000-2018 років місячної температури повітря на метеорологічних станціях Ізмаїл, Любашівка, Одеса, Миколаїв та Очаків порівняно з даними Кадастру. Також показані середні квадратичні відхилення за даними Кадастру

Fig. 2 – Long-term monthly air temperature for 2000–2018 at meteorological sites Izmail, Lyubashivka, Odesa, Mykolaiv, Ochakiv compared with Cadastre data. Standard deviations for Cadastre data are also presented

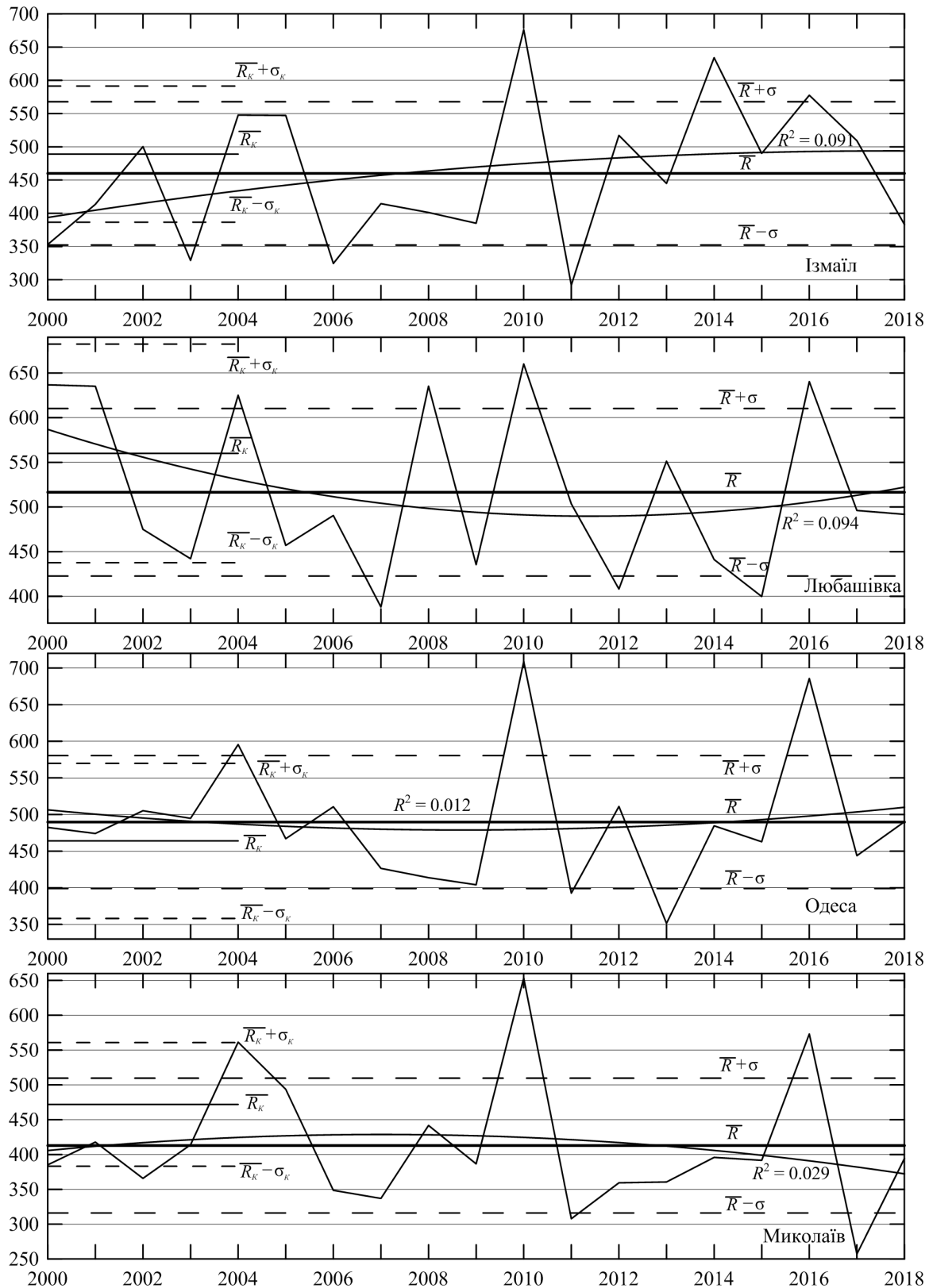


Рис. 3 – Річна сума опадів (мм) протягом 2000–2018 років на метеорологічних станціях Ізмаїл, Любашівка, Одеса, Миколаїв та Очаків порівняно з даними Кадастру. Також показані середні за зазначений період та середні квадратичні відхилення, а також лінія поліноміального тренда другого степеня

Fig. 3 – Annual precipitation (mm) for 2000–2018 at meteorological sites Izmail, Lyubashivka, Odesa, Mykolaiv, Ochakiv compared with Cadastre data. Long-term annual means, standard deviations, and second-degree polynomial trend line are also presented

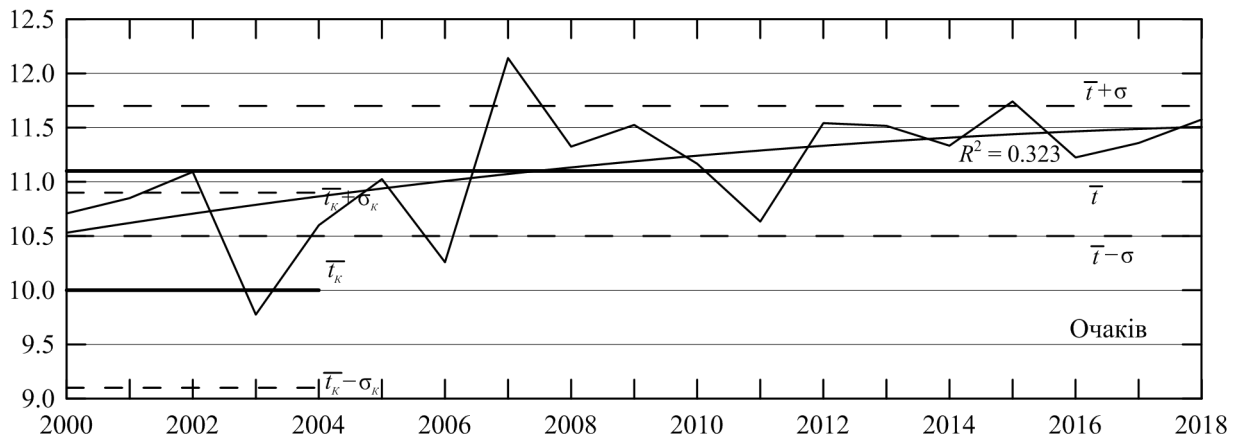


Рис. 3 – Продовження
Fig. 3 – Continued

Таблиця 2 – Статистичні характеристики кількості опадів (мм) за період 2000–2018 років у порівнянні з даними Кадастру
Table 2 – Statistical characteristics of precipitation (mm) for 2000–2018 compared with Cadastre data

№ п/п	Найменування станції	Період 2000–2018 років		Дані Кадастру		
		\bar{R}	σ	\bar{R}_K	σ_K	$K_{вар, K}$
1	Ізмаїл	460	107,8	489	102,4	0,21
2	Любашівка	516	93,8	560	122,4	0,22
3	Одеса	490	90,7	464	105,9	0,23
4	Миколаїв	413	96,8	472	88,8	0,19
5	Очаків	425	84,0	417	84,0	0,20

Таблиця 3 – Характеристики трипараметричного гамма-розподілу річної суми опадів за період 2000–2018 років
Table 3 – Characteristics of three-parameter gamma distribution for annual precipitation for 2000–2018

№ п/п	Найменування станції	\bar{R} , мм	λ	α , мм	c , мм	Ex	As	$K_{вар}$
1	Ізмаїл	460	49,6	15,3	-298,9	0,12	0,28	0,23
2	Любашівка	516	46,2	13,8	-120,8	0,13	0,29	0,18
3	Одеса	490	4	45,5	309	1,51	1,0	0,19
4	Миколаїв	413	4,8	44,2	201,2	1,25	0,9	0,23
5	Очаків	425	2,1	57,6	302,4	2,8	1,4	0,2

Примітка до табл. 2 і 3. $K_{вар}$ – коефіцієнт варіації.

Одночасно на станції Миколаїв простежується тенденція до зниження річної суми опадів.

4. Середні значення багаторічних кількостей опадів за аналізований період на станціях Ізмаїл, Любашівка, Миколаїв менші, ніж за період 1961–1990 років, у середньому на 33 мм. В Одесі, навпаки, має місце перевищення значення зазначеного в Кадастрі на 26 мм (табл. 2).

5. Також присутні відмінності й в стандартних відхиленнях багаторічних річних сум опадів (див. табл. 2), найбільша з яких, у порівнянні з Кадастром, має місце на станції Любашівка (93,8 мм і 122,4 мм, відповідно), а найменше – в Ізмаїлі (107,8 мм і 102,4 мм, відповідно). Причому, на станціях Ізмаїл та Миколаїв значення стандартних відхилень дещо більші, ніж аналогічні у Кадастрі, а на станціях Одеса і Любашівка –

менші. Проте, беручи до уваги значення коефіцієнта варіації, можна зробити висновок про відсутність суттєвих змін коливальності в розподілі опадів (пор. табл. 2 і 3).

6. Дані зазначені в табл. 3 і 4 свідчать про таке:

а) відповідно до високих значень параметра форми λ , розподіл річних сум опадів наближається до нормального закону. Крім того, при гамма-розподілі з урахуванням третього параметра (зсуву), якій сприяє більш точному розрахунку характеристик, найбільш близькими до нормального закону є розподіли на станціях Ізмаїл та Любашівка. При двохпараметричному гамма-розподілі показники параметра форми дещо вирівнюються;

Таблиця 4 – Характеристики двохпараметричного гамма-розподілу річної суми опадів за період 2000–2018 років
Table 4 – Characteristics of two-parameter gamma distribution for annual precipitation for 2000–2018

№ п/п	Найменування станції	\bar{R} , мм	λ	α , мм	$E\alpha$	$A\sigma$	σ , мм	D_g , мм ²	M_0 , мм
1	Ізмаїл	460	18,2	25,2	0,32	0,47	107,8	11614	434,8
2	Любашівка	516	30,3	17,0	0,2	0,36	93,8	8799	499,4
3	Одеса	490	29,2	16,8	0,21	0,37	90,7	8226	472,9
4	Миколаїв	413	18,2	22,7	0,33	0,47	96,8	9362	390,2
5	Очаків	425	25,6	16,6	0,23	0,4	84	7058	408,4

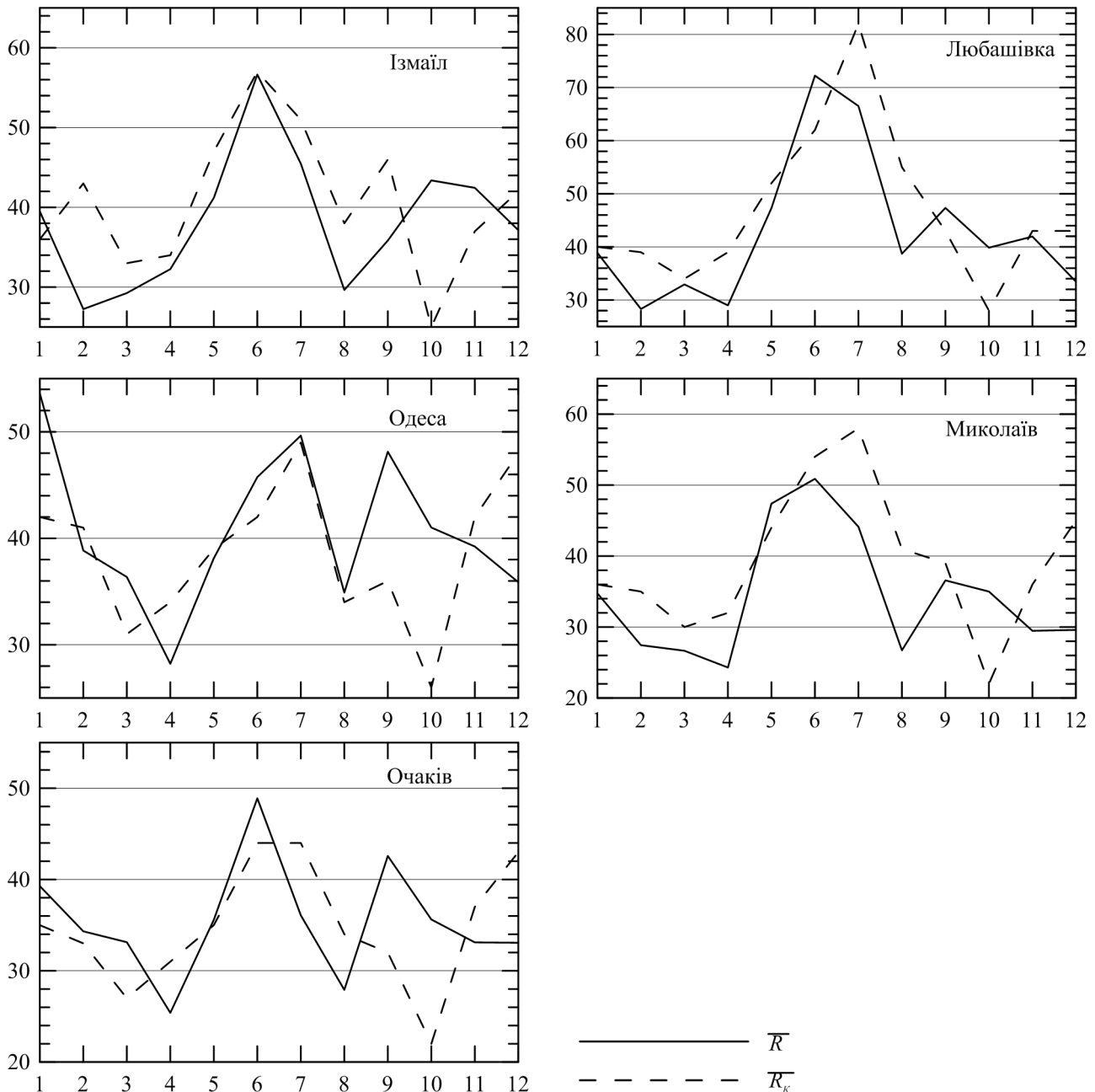


Рис. 4 – Річний хід середньої за період 2000–2018 років місячної кількості опадів на метеорологічних станціях Ізмаїл, Любашівка, Одеса, Миколаїв та Очаків порівняно з даними Кадастру
Fig. 4 – Long-term monthly precipitation for 2000–2018 at meteorological sites Izmail, Lyubashivka, Odesa, Mykolaiv, Ochakiv compared with Cadastre data

б) зміна параметра масштабу α повністю відповідає зміні параметрам форми. Якщо значення λ є великими, α набуває менших значень, що означає зменшення розкиду розглянутої метеорологічної величини. Теж саме спостерігається при варіаціях знака при параметрі зсуву (табл. 3): при додатному зсуві c , λ – більше, α – менше, і навпаки;

в) ексцес Ex і асиметрія As є додатними, тобто «хвіст» стає більш важким з правого боку, що показує зсув середньої величини праворуч від значення медіани, а значить збільшення найбільш великих значень.

Криві на рис. 4 описують річний хід місячних сум опадів осереднених за період 2000–2018 і 1961–1990 років (Кадастр).

На графіках можна побачити, що за винятком Одеси у річному ході основні максимуми спостерігаються в літній період, що є природнім (Ізмаїл – 56,6 мм у червні, Любашівка – 72,2 мм у червні, Одеса – 49,6 мм у липні, Миколаїв – 50,9 мм у червні, Очаків – 48,9 мм у червні). В Одесі найбільша кількість опадів випала в січні 53,6 мм. Мінімальна кількість опадів для усіх станцій відзначається трьома-чотирма екстремумами з приблизно рівними значеннями (мінімуми в Ізмаїлі – у лютому 27,2 мм, у Любашівці – у лютому 28,3 мм, в Одесі – у квітні 28,2 мм, у Миколаїв – у квітні 24,3 мм, в Очакові – у квітні 25,4 мм).

Порівняльний аналіз даних за період 2000–2018 років з даними Кадастру дозволяє зробити висновок про те, що на станціях Ізмаїл, Любашівка, Миколаїв, у цілому, спостерігається зменшення кількості місячних опадів (за винятком опадів в жовтні). В Одесі, навпаки, для більшості місяців середні за період суми опадів перевищують аналогічні значення за період 1961–1990 рр., що зазначені в Кадастрі.

4. ВИСНОВКИ

В розподілі середньої річної температури повітря в осатні майже двадцять років простежується загальний тренд зростання, не зважаючи на те, що у часовому розподілі чітко виокремлюються два періоди: 2000–2006 та 2007–2018 років. Причому, у першому випадку спостерігається незначне зниження, а у другому – збільшення значень цієї характеристики. Крім того, є відмінності, спричинені як результат різного географічного розташування станцій, наприклад, близькістю до моря (Одеса, Миколаїв, Очаків) або віддаленістю від нього (Любашівка, Ізмаїл). У середніх за період місячних температур більш одноманітний хід з перевищенням даних Кадас-

тру, особливо влітку (на інтервал в 1σ). Загальною рисою також є зменшення відносно періоду 1961–1990 років середньоквадратичного відхилення, як показника коливальності значень.

На відміну від розподілів середньомісячної температури у розподілах сум опадів спостерігається більше відмінностей. Так, неоднорідності у сезонному багаторічному ході присутні як по відношенню до значень Кадастру (яскравий приклад Любашівка і Одеса), так і в залежності від географічного розташування, що є природнім (наприклад, Миколаїв і Одеса). Загальною рисою є збільшення опадів в осінній період та зменшення у зимовий (за виключенням станції Очаків). Що стосується розподіла річних сум опадів, то чітка тенденція зростання є тільки на станції Ізмаїл, а падіння – на станції Миколаїв. Інші дані не мають переважних знаків спрямованості часового ходу кількості опадів. Проте, пікові значення цієї кліматичної характеристики на кожній станції підпорядковуються коливальному процесу, тобто мають квазіперіодичності, дослідження яких можливе тільки за умов більшої довжини відповідних рядів.

На останнє, враховуючи, що підстильна поверхня за обраний час не може істотно змінитися, основним фактором представлених змін можна вважати зміну циркуляції атмосфери, яка у свою чергу може бути результатом кліматичних змін. Тому у подальшому доцільно досліджувати й характеристики клімату й у найближчому майбутньому, як це, наприклад, зроблено в роботах [31, 32].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Parker D. E. et al. Interdecadal changes of surface temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. 1994. Vol. 99, Pp. 14373-14399.
2. NASA Analysis Finds Warmest September on Record by Narrow Margin. URL: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/news/20161017/> (дата звернення 04.11.2020)
3. Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ: Ніка-центр. 2003. 343 с.
4. Клімат России в XXI веке. Часть I. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета / Мелешко В. П. и др. *Метеорология и гидрология*. 2008. №6. С. 5-19.
5. Regional Climate Projections / Christensen J. H. et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the Fourth Assessment Report of the IPCC* / Edited by Solomon S. D. et al. Cambridge (UK) and New York (USA): Cambridge University Press, 2007. 94 p.
6. Air temperature trends and extremes in Chisinau (Moldova) as evidence of climate change / Corobov R. et al. *Climatic Research*. 2010. Vol. 42. Pp. 247-256.
7. IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Edited by Stocker T. F., et al. Cambridge (UK) and New York (USA):

Cambridge University Press, 2013.

8. The Community Earth System Model (CESM) Large Ensemble Project: A community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability / Kay J. E. et al. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. Vol. 96. Pp. 1333-1349.
9. A census of atmospheric variability from seconds to decades / Williams P. D. et al. *Physical Research Letters*. 2017. Vol. 44. Pp. 11201-11211.
10. Hansen J., Sato M., Ruedy R. Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. Vol. 109. Pp. E2415-E2423.
11. The projected timing of climate departure from recent variability / Mora C. et al. *Nature*. 2013. Vol. 502. Pp. 183-187.
12. Observations: Atmosphere and Surface / Hartmann D.L. et al. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* / Edited by Stocker T. F. et al. Cambridge (UK) and New York (USA): Cambridge University Press, 2013. Pp. 159-254.
13. Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5 °C and 2 °C global warming with a higher-resolution global climate model / Betts R. A. et al. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2018. Vol. 376. 20160452.
14. Emergence of heat extremes attributable to anthropogenic influences / King A. D. et al. *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43. Pp. 3438-3443.
15. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities / Sillmann J. et al. *Weather and Climate Extremes*. 2017. Vol. 18. Pp. 65-74.
16. Alexander L., Perkins S. Debate heating up over changes in climate variability. *Environmental Research Letters*. 2013. Vol. 8. 041001.
17. Disentangling global warming, multidecadal variability, and El Niño in Pacific temperatures / Wills R. C. et al. *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45. Pp.2487-2496.
18. Uncertainty partition challenges the predictability of vital details of climate change / Fatichi S. et al. *Earth's Future*. 2016. Vol. 4. Pp. 240-251.
19. Giorgi F. Dependence of the surface climate interannual variability on spatial scale. *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29. Pp. 1611-1614.
20. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Санкт-Петербург: Изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
21. Афанасьев В. Н. Анализ временных рядов и прогнозирование. Москва: Финансы и статистика, 2001. 228 с.
22. Дубровская Л. И., Князев Г. Б. Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики: учеб. пособие. Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. 120 с.
23. Исаев А. А. Статистика в метеорологии и климатологии: монография. Москва: Изд-во МГУ, 1988. 248 с.
24. Пановский Г. А. Статистические методы в метеорологии: монография. Ленинград: Гидромет. изд-во, 1967. 241 с.
25. Науменко Л. Ю. Статистична структура полів літніх опадів на території Українського степу при західних циркуляційних процесах. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 1991. № 1. С. 73-79.
26. Золина О. Г., Бульгина О. Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Вып. 1. С. 84-103.
27. Многолетние изменения температуры воздуха и атмосферных осадков в Казани / Верещагин М. А. и др. *Ученые*

- записки Казанского государственного университета*. 2005. Т. 147. С. 151-166.
28. Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971-2010, Keegenhoff I. et al. *Weather and Climate Extremes*. 2014. Vol. 4. Pp. 75-85.
29. Kusunoki S., Mizuta R., Hosaka M. Future changes in precipitation intensity over the Arctic projected by a global atmospheric model with a 60-km grid size. *Polar Science*. 2015. №9. Pp. 277-292.
30. Milanovic M., Gocic M., Trajkovic S. Analysis of extreme climatic indices in the area of Nis and Belgrade for the period between 1974 and 2003. *Agriculture and agricultural science procedia*. 2015. №4. Pp. 408-415.
31. Хохлов В. М., Латиш Л. Г., Цимбалюк К. С. Можливі зміни температурного режиму в Україні у 2011-2025 роках. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2009. Вип. 8. С. 70-78.
32. Хохлов В. М., Бондаренко В. М., Латиш Л. Г. Просторовий розподіл аномалій опадів в Україні у 2011-2025 роках. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2009. № 5. С. 54-62.

REFERENCES

1. Parker, D.E. et al. (1994). Interdecadal changes of surface temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 99, pp. 14373-14399.
2. *NASA Analysis Finds Warmest September on Record by Narrow Margin*. Available at: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/news/20161017/> (Accessed: 04.11.2020).
3. Lipinsky, V.M., Diachuk, V.A. & Babichenko, V.M. (eds). (2003). *Klimat Ukrainy [Climate of Ukraine]*. Kyiv: Nika-Tsentr. (in Ukr.)
4. Meleshko, V.P., Katsov, V.M., Mirvis, V.M. et al. (2008). *Klimat Rossii v XXI veke. Chast' I. Novye svidetel'stva antropogennogo izmeneniya klimata i sovremennye vozmozhnosti ego rascheta*. [Climate of Russia in the 21th century. Part I. New evidence of anthropogenic climate change and modern possibilities of its calculation] *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology]*. 6, pp. 5-19. (in Russ.)
5. Christensen, J.H., Hewitson B., Busuioc A. et al. (2007). *Regional Climate Projections*. In: Solomon S. D. Qin M. Manning, Z. Chen et al. (eds). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
6. Corobov, R., Sheridan, S., Overcenko, A. et al. (2010). Air temperature trends and extremes in Chisinau (Moldova) as evidence of climate change. *J. Clim. Res.*, 42, pp. 247-256.
7. IPCC (2013). In: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. (eds). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
8. Kay, J.E., Deser, C., Phillips, A. et al. (2015). The Community Earth System Model (CESM) Large Ensemble Project: A community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(8), pp. 1333-1349.
9. Williams, P.D., Alexander, M.J., Barnes, E. A. et al. (2017). A census of atmospheric variability from seconds to decades. *Geophysical Research Letters*, 44(21), pp. 11201-11211.
10. Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (2012). Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(37), pp. E2415-E2423.
11. Mora, C., Frazier, A.G., Longman, R.J. et al. (2013). The projected timing of climate departure from recent variability.

Nature, 502, pp. 183-187.

12. Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M. et al. (2013). Observations: Atmosphere and Surface. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K. et al (eds.). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp. 159–254.
13. Betts, R.A., Alfieri, L., Bradshaw, C. et al. (2018). Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5 °C and 2 °C global warming with a higher - resolution global climate model. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2119), 20160452.
14. King, A.D., Black, M.T., Min, S.K. et al. (2016). Emergence of heat extremes attributable to anthropogenic influences. *Geophysical Research Letters*, 43(7), pp. 3438-3443.
15. Sillmann, J., Thorarindottir, T., Keenlyside, N. et al. (2017). Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities. *Weather and Climate Extremes*, 18, pp. 65-74.
16. Alexander, L., & Perkins, S. (2013). Debate heating up over changes in climate variability. *Environmental Research Letters*, 8(4), 041001.
17. Wills, R.C., Schneider, T., Wallace, J.M. et al. (2018). Distinguishing global warming, multidecadal variability, and El Niño in Pacific temperatures. *Geophysical Research Letters*, 45(5), pp. 2487-2496.
18. Fatichi, S., Ivanov, V.Y., Paschalis, A., et al. (2016). Uncertainty partition challenges the predictability of vital details of climate change. *Earth's Future*, 4(5), pp.240-251.
19. Giorgi, F. (2002). Dependence of the surface climate inter-annual variability on spatial scale. *Geophysical Research Letters*, 29(23), pp. 1611-1614.
20. Malinin, V.N. (2008). *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii [Statistical methods of analysis of hydrometeorological information]*. Saint-Petersburg: Publ RGGMU. (in Russ.)
21. Afanas'ev, V.N. (2001). *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovanie [Time series analysis and forecasting]*. Moscow: Finansy i statistika. (in Russ.)
22. Dubrovskaya, L.I. & Knyazev, G.B. (2011). *Komp'yuternaya obrabotka estestvenno-nauchnykh dannykh metodami mnogomernoy prikladnoy statistiki [Computer processing of natural science data by methods of multivariate applied statistics]*: Tomsk: TML-Press. (in Russ.)
23. Isaev, A.A. (1988). *Statistika v meteorologii i klimatologii [Statistics in meteorology and climatology]*. Moscow: Publ MGU. (in Russ.)
24. Panovskiy, G.A. (1967). *Statisticheskie metody v meteorologii [Statistical Methods in Meteorology]*. Leningrad: Gidromet. Publ. (in Russ.)
25. Naumenko, L.Ju. (1991). Statystychna struktura poliv litynkh opadiv na terytorii Ukrainskoho stepu pry zakhidnykh tsirkulatsiynnykh protsesakh [Statistical structure of summer precipitation fields on the territory of the Ukrainian steppe during western circulation processes]. *Visn. Kiiv. nac. un-tu im. Tarasa Shevchenka [Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv]*, 1, pp. 73-79. (in Ukr.)
26. Zolina, O.G. & Bulygina O.N. (2016). Sovremennaya klimaticheskaya izmenchivost kharakteristik ekstremalnykh osadkov v Rossii [Current climatic variability of extreme precipitation in Russia]. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and applied climatology]*, 1, pp. 84-103 (in Russ.)
27. Vereshchagin, M.A., Perevedentsev, Ju.P., Naumov, Je.P. et al. (2005). Mnogoletnie izmeneniya temperatury vozdukh i atmosferynykh osadkov v Kazani [Long-term changes in air temperature and precipitation in Kazan]. *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of Kazan University]*, 147, book 3, pp. 151-166. (in Russ.)
28. Keggenhoff, I., Elizabarashvili, M. et al. (2014). Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971-2010. *Weather and climate extremes*, 3, pp. 75-85.
29. Kusunoki, S., Mizuta, R. & Hosaka, M. (2015). Future changes in precipitation intensity over the Arctic projected by a global atmospheric model with a 60-km grid size. *Polar Science*, 9, pp. 277-292.
30. Milanovic, M., Gocic, M. & Trajkovic, S. (2015) Analysis of extreme climatic indices in the area of Nis and Belgrade for the period between 1974 and 2003. *Agriculture and agricultural science procedia*, 4, pp. 408-415.
31. Khokhlov, V.M., Latysh, L.H. & Tymbaliuk, K.S. (2009). [Possible thermal condition changes in Ukraine in 2011-2025]. *Visnik Odes'kogo derzavnogo ekologichnogo universitetu [Bulletin of Odessa State Environmental University]*, 8, pp. 70-78. (in Ukr.)
32. Khokhlov, V.M., Bondarenko, V.M. & Latysh, L.H. (2009). [Spatial distribution of precipitation anomalies in Ukraine in 2011-2025]. *Ukr. gidrometeorol. zh. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 5, pp. 54-62. (in Ukr.)

MODERN DYNAMICS IN MAIN CLIMATE CHARACTERISTICS AT SITES OF NORTH-WESTERN BLACK SEA COAST

E. N. Serga, V M. Khokhlov, L. V. Nedostrelova

Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., 65016, Odesa, Ukraine
Serga_ed@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6470-8540>

The aim of the study is to determine statistical estimates for the distributions of average monthly and annual temperatures, as well as monthly and annual precipitation for the North-Western Black Sea coast during the climatic change intensification epoch. Parameters of the normal distribution for temperature, two- and three-parametric gamma distribution for precipitation, as well as trend characteristics, are analyzed. To determine the deviation of the values from the previous climatic period, the data of the Climate Cadastre of Ukraine (1961–1990) were used.

The results of the statistical analysis show that steady trend towards an increase in annual air temperatures exists at all stations during the period (2000-2018). In the time course of these characteristics, there is a clearly pronounced separation into two periods with the transition point in 2007. The average monthly air temperatures for the period generally exceed the same values for 1961-1990, and this is especially evident for the summer months.

Time distributions of monthly precipitation are spatially heterogeneous. It was found for Odesa that the maxima are observed in January, July and September, in contrast to other stations, at which the maximum amount of precipitation is registered in the summer months. Also, at the Odesa, the monthly precipitation in most months exceeds the same values for 1961-1990. Annual precipitation during 2000-2018 has a lot of regularities and differences, among which, for example, a common feature is the presence of maxima in 2010. In accordance with the general period trend characteristics, a tendency to an increase in the annual precipitation was found in the very south (Izmail station) only, and it has been especially pronounced since 2009. However, their mean values are lesser than in the Climate Cadastre of Ukraine; this is also observed for the stations Lyubashivka and Mykolaiv. On the contrary, at stations located on the coast (Odesa, Ochakiv), the annual precipitation exceeds of values from the Cadastre.

Based on the analysis carried out, it can be concluded that all persistent tendencies to changes in the values of the considered climatic characteristics are associated with a possible change in the atmospheric circulation over the considered territory.

Keywords: average monthly temperature, annual temperature, monthly precipitation, annual precipitation, gamma distribution, excess, asymmetry.

СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОСНОВНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА СТАНЦИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ

Э. Н. Серга, В. Н. Хохлов, Л. В. Недострелова

Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина
Serga_ed@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6470-8540>

Целью исследования является определение статистических оценок распределений среднемесячных и годовых температур, а также месячных и годовых сумм осадков, как основных климатических характеристик, для Северо-Западного Причерноморья в эпоху интенсификации климатических изменений. Проанализированы параметры нормального распределения для температуры, двух- и трехпараметрического гамма-распределения для осадков, а также трендовые характеристики. Для определения отклонения значений от предыдущего климатического периода использовались данные Климатического кадастра Украины (1961–1990 гг.).

Результаты статистического анализа показывают, что в течение периода (2000-2018 гг.) наблюдается устойчивая тенденция к росту годовых температур воздуха на всех рассмотренных станциях. Во временном ходе этих характеристик имеются чётко выраженное разделение на два периода с точкой перехода в 2007 г. Средние за период месячные температуры воздуха в целом превышают такие же значения за 1961-1990 гг., особенно явно это прослеживается для летних месяцев.

Временные распределения месячных сумм осадков неоднородны в пространстве. Установлено, что в Одессе, в отличие от других станций, на которых максимальное количество осадков приходится на летние месяцы, максимумы наблюдаются в январе, июле и сентябре. Кроме того, на станции Одесса суммы осадков в большинстве месяцев превышают аналогичные за 1961–1990 годы. Годовые суммы осадков в течение 2000-2018 гг. имеют ряд закономерностей и различий, среди которых, например, общей чертой является наличие максимальных значений в 2010 году. В соответствии с общепериодными трендовыми характеристиками установлено, что только на самом юге (станция Измаил) присутствует тенденция к увеличению годового количества осадков, особенно хорошо выраженная с 2009 года. Однако, их среднестатистические значения, как и на станциях Любашевка, Николаев, меньше, чем в Климатическом кадастре Украины. Напротив, на станциях, расположенных на побережье (Одесса, Очаков), наблюдается превышение аналогичных значений.

Основываясь на проведенном анализе, можно сделать вывод о том, что все устойчивые тенденции к изменениям значений рассмотренных климатических характеристик связаны с возможным изменением циркуляции атмосферных процессов над рассмотренной территорией.

Ключевые слова: среднемесячная температура, годовая температура, месячные суммы осадков, годовые суммы осадков, гамма-распределение, эксцесс, асимметрия.

Подання до редакції : 10. 11. 2020
Надходження остаточної версії : 09. 12. 2020
Публікація статті : 17. 12. 2020

УДК: 551.577

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ СИЛЬНИХ ОПАДІВ НАД УКРАЇНОЮ ПРОТЯГОМ 1979-2019 РОКІВ ЗА ДАНИМИ РЕАНАЛІЗУ ERA5

А. Б. Семергей-Чумаченко, К. Л. Слободяник

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
asemersey2016@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8718-4073>
<https://orcid.org/0000-0003-1118-4469>

Представлені результати дослідження сильних та надзвичайних опадів у вигляді дощу (>50 мм/12 год) та снігу (>20 мм/12 год) з використанням даних атмосферного реаналізу ERA5 за період 1979-2019 рр. За інформацією Європейського центру середньострокових прогнозів, яка отримана за допомогою чисельного моделювання і є результатом асиміляції даних у вузлах регулярної сітки з просторовою роздільною здатністю $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$, на території України виявлено 131 та 136 днів з дощем та снігом, коли інтенсивність опадів досягла критеріїв стихійних метеорологічних явищ II та III рівнів небезпечності. З'ясовано, що за останні 40 років в Україні спостерігалася наявна тенденція до збільшення кількості випадків сильних снігопадів, а кількість сильних дощів незначно зменшувалася.

Значна увага приділяється просторо-часовому аналізу повторюваності та інтенсивності сильних опадів з урахуванням географічних чинників. Визначено сезонний хід утворення сильних та надзвичайних опадів, максимуми та мінімуми якого не відрізнялися від кліматичних норм за даними метеорологічних спостережень. Дощі з кількістю опадів більше 50 мм за 12 годин спостерігалися практично над всією територією України, а зони максимумів повторюваності припадали на райони Карпатських гір, Донецького кряжу, Подільської височини та південний захід країни. Сильні снігопади з кількістю опадів більше 20 мм за 12 годин найчастіше виникали у Карпатському регіоні. Аналіз географічного розподілу виявив осередок з максимальними значеннями інтенсивності дощу (120-133 мм/12 год.) біля узбережжя Азовського моря, а найсильніші снігопади (34-38 мм/12 год) переважно утворювалися в районі Карпат.

Встановлені типи елементарних циркуляційних механізмів синоптичної класифікації атмосферних процесів північної півкулі Б. Л. Дзердзєєвського, при збереженні яких опади у вигляді дощу та снігу значно посилювались.

Випадки з максимальною інтенсивністю дощу за даними реаналізу виявлені з 23 по 27 липня 2008 року, коли спостерігався катастрофічний паводок в Українських Карпатах, що свідчить про адекватне відтворення за допомогою моделі Європейського центру середньострокових прогнозів структури поля сильних опадів над територією України.

Ключові слова: дані реаналізу; ERA5; сильні опади; надзвичайні опади; елементарні циркуляційні механізми.

1. ВСТУП

Глобальні кліматичні зміни за останні десятиріччя супроводжуються збільшенням екстремальних погодних умов в усіх регіонах Земної кулі. За результатами дослідження Міжурядової групи експертів по змінам клімату [1], спостережені кліматичні тенденції та майбутні прогнози, з високою вірогідністю, вказують на збільшення кількості надзвичайних опадів над Північною та Центральною (континентальною) Європою, в тому числі й над Україною, причому в багатьох випадках це пов'язано з внутрішньою мінливістю клімату.

Сильні опади являються причиною утворення стихійних паводків у гірських районах, зок-

рема на заході (руйнування транспортних комунікацій, пошкодження ліній електромереж, підтоплення житлових будинків, нерідко з жертвами серед населення), а на рівнинній території порушують функціонування господарського комплексу країни (посилення ерозії родючого шару ґрунту, зниження урожайності сільськогосподарських культур та ін.), тобто впливають фактично на всі сфери життєдіяльності людини та економіки країни. Так, влітку 2020 р. у п'яти областях на заході країни в результаті катастрофічного паводку, спричиненого сильними дощами, постраждало щонайменше 250 населених пунктів, пошкоджено 750 км автодоріг, загинуло 4 людини. На ліквідацію наслідків

урядом України було виділено 700 млн грн, загальні збитки від стихійного лиха оцінюються на суму 3-4 млрд грн [2].

Актуальність даної роботи обумовлюється збільшенням інтенсивності екстремальних та стихійних явищ за поточне десятиріччя. Тому подібні дослідження є важливими для економіки та екології країни, оскільки стихійні лиха погіршують їх стан, знижують сталий розвиток та дестабілюють соціально-політичне життя суспільства.

Метою цього дослідження є визначення режиму формування небезпечних та надзвичайних опадів, актуальних особливостей їх просторово-часового розподілу з 1979 по 2019 рр. для території України.

Завдання дослідження полягає у проведенні збору та первинної обробки вихідної інформації, а саме виявлення випадків сильних та надзвичайних опадів по території України за 40-річний період за допомогою ресурсу [3].

Відповідно до нової «Настанови з метеорологічного прогнозування», яка набула чинності на початку 2019 р., дощ, за який випадає 50 мм і більше за 12 год і менше, вважається сильним і відноситься до стихійного метеорологічного явища (СМЯ) II рівня небезпечності, яке за кількісними показниками, тривалістю та територією розповсюдження несе загрозу для населення, порушує функціонування господарського комплексу країни. В Україні снігопад стає стихійним явищем погоди (СМЯ II рівня небезпечності), коли за 12 год і менше випадає більше 20 мм опадів [4].

Згідно [5], кількість опадів, що сягає 50 мм і більше за 12 год і менше щорічно спостерігається в усіх регіонах України. При чому, найчастіше (за 95-100%-вої ймовірності) сильні дощі спостерігаються в Українських Карпатах [6]. Один раз за 5-10 років вони ймовірні у інших регіонах [7].

В Україні переважають (85%) сильні снігопади під час яких за 12 год і менше в середньому по області випадає від 20 до 30 мм опадів. Снігопади такої інтенсивності спостерігаються на переважній більшості території країни. Виняток становлять гірські райони Карпат та Криму, Запорізька, Дніпропетровська, Київська та Сумська області, де випадають опади більшої інтенсивності [5].

Оскільки вищеописані явища завдають не тільки колосальних матеріальних збитків, але є небезпечними для життя людини, вони вимагають детального вивчення, аналізу та прогнозування, задля своєчасного реагування та змен-

шення їх руйнівних наслідків.

Цьому питанню присвячено чимало робіт науковців різних країн, в тому числі і українських вчених. Детально проблема стихійних метеорологічних явищ на території України розглянута у монографіях “Клімат України” [7] та “Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 рр.)” [8]. Особливо небезпечні опади досліджувались В. М. Бабіченко [7], В. І. Осадчим [9], В. О. Балабух [5,10], В. Ф. Мартазіною [11] та іншими. В цих роботах представлені відомості про сучасну динаміку режиму утворення сильних опадів, характеристика параметрів фізичного стану атмосфери та атмосферної циркуляції.

2. ОПИС МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Поняття реаналізу даних

Відомо, що для успішного проведення будь-якого дослідження важливою умовою є надійність вихідних даних [12]. Головною проблемою використання реальних даних спостережень є присутність цілих періодів часу, коли спостереження не проводилися. А отже ряди цих даних не є безперервними і не можуть бути використані як достовірні. Саме тому все частіше в наукових дослідженнях використовують дані реаналізу. Повторний аналіз або реаналіз об'єднує в собі дані моделювання зі спостереженнями з усього світу в повний і узгоджений набір даних з використанням фізичних законів. Тобто ці дані отримані за допомогою чисельного моделювання і являють собою результати асиміляції даних у вузлах регулярної сітки.

В якості вихідних даних для дослідження взяті дані про опади реаналізу ERA5, що були розроблені Європейським центром середньострокових прогнозів (ECMWF) [13] та надані Службою з питань змін клімату Copernicus (Copernicus Climate Change Service) [3]. Вказана модель зарекомендувала себе як надійне джерело вихідних даних у багаточисленних світових та вітчизняних дослідженнях [12,14,15].

У досліджуванні використовувались наступні параметри:

- загальна кількість опадів (м) – накопичена вода у рідкому та замерзломому стані (дощ, сніг) за певний період часу;
- поле снігопадів (м) – накопичений сніг, що досягає земної поверхні за певний період часу.

Обидва параметри містять у собі великомасштабні та конвективні складові опадів. Згідно

моделі, великомасштабні опади генеруються за хмарною схемою в інтегрованій системі прогнозування (IFS) ECMWF. Параметри накопичуються за певний період часу, який залежить від обраного дослідником часового інтервалу у вихідному запиті на завантаження. Для даного реаналізу період накопичення дорівнює 1 годині і більше. Системними одиницями вимірювання є метри, тобто кількість води, рівномірно розподіленої по квадрату сітки.

Отже, були отримані погодинні дані у вузлах регулярної сітки з просторовою роздільною здатністю $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ для періоду з 1979 по 2019 рр. для всієї території України (рис. 1). Вибір періоду дослідження обумовлений безпосередньо часовим покриттям моделі, також він являється оптимальним для вивчення тенденції змін у характеристиках атмосферних опадів [16].

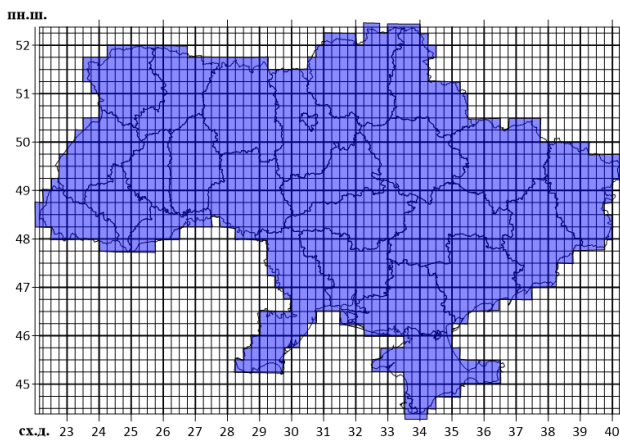


Рис. 1 – Розташування вузлів сітки реаналізу ERA5 (з просторовою дискретністю $0,25^{\circ}$ за широтою та довготою) на території дослідження

Fig. 1 - Location of nodes of the ERA5 reanalysis grid (0.25° latitude \times 0.25° longitude grid size) in the study area

Опади є одним із найбільш мінливих у часі і просторі метеорологічних явищ, тому поле опадів у кожній точці простору характеризується їх сумою за фіксований інтервал часу. Для досягнення необхідного критерію стихійності та інтервалу часу для дощу і снігу (> 50 мм / > 20 мм за 12 год і менше відповідно) було проведено послідовне ковзне сумування 12-ти годинного інтервалу з кроком у 1 годину. Після чого, розраховані суми були відфільтровані за вищевказаними критеріями, у випадку виявлення сум у послідовні строки, залишалися лише максимальні значення. Тобто, операція ковзного сумування, а не звичайного (при якому доба була б поділена на 2 часових проміжки по 12 годин), є необхідною, аби не пропустити випадку накопичення потрібної кількості опадів за 12 годин.

При цьому слід розуміти, що порівняння параметрів моделі із даними спостереження є обмеженими, оскільки фактичні дані є локальними для певної точки простору та часу, а параметри моделі представляють собою осереднені показники за полем сітки.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

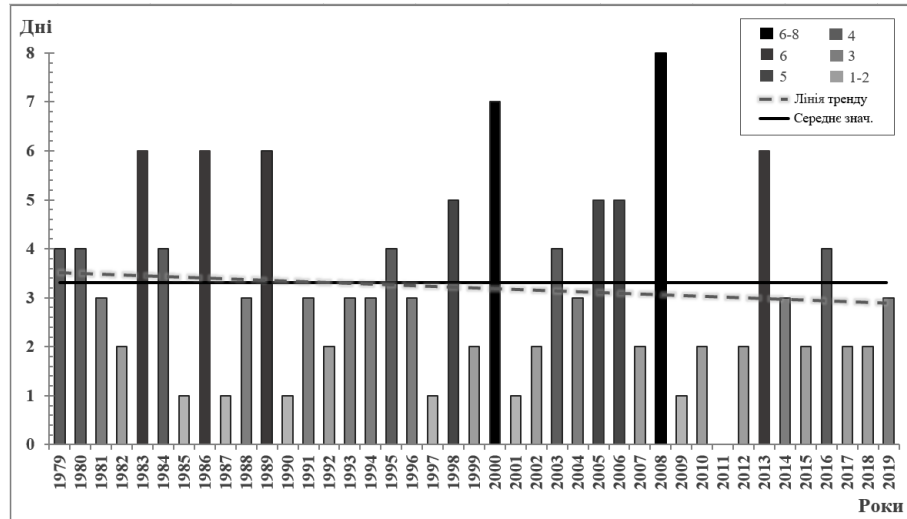
В ході роботи був виявлений 131 день з сильним та надзвичайним дощем та 136 днів з сильним та надзвичайним снігом. В середньому на рік припадало по 3 дні з опадами, що досягали критеріїв СМЯ II, III рівнів небезпечності.

На рис. 2-3 у вигляді стовпчастих діаграм представлений розподіл кількості днів з стихійними опадами для кожного року досліджуваного періоду з нанесеними лінією тренду (сірого кольору) та середнім за 40-річний період значенням кількості днів (для дощу – лінія зеленого кольору, 3,2 дні; для снігу – лінія синього кольору, 3,3 дні).

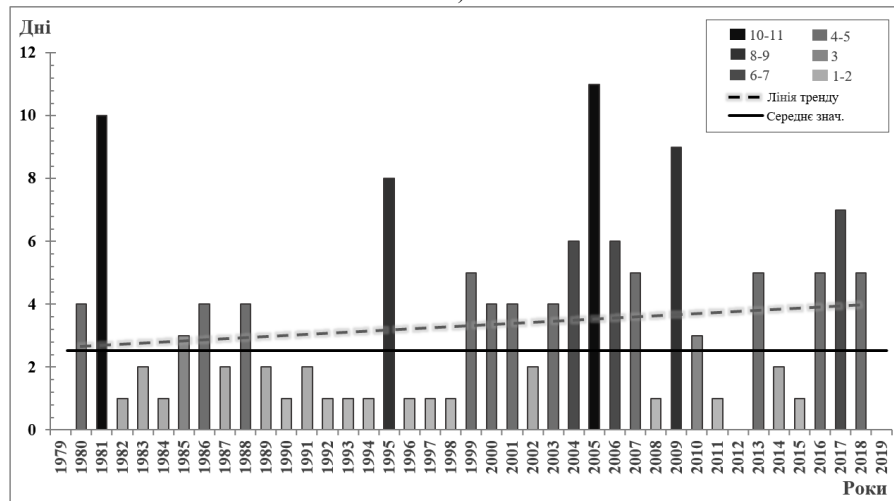
Максимальна кількість днів з сильним та надзвичайним дощем відзначалась у 2008 та 2000 рр. – 8 та 7 днів відповідно, у 1983, 1986, 1989 та 2013 рр. – по 6 днів. У 2011 р. реаналізом не виявлено жодного дня із сильним дощем. Аналіз міжрічної мінливості показав умовне збільшення випадів сильного дощу з 1993 по 2000 рр. та з 2002 по 2008 рр. Проте, для періоду 1979-2019 рр. в загальному ході повторюваності простежується слабка тенденція до зменшення днів із сильним та надзвичайним дощем (рис. 2а).

Найбільша кількість днів з опадами у вигляді снігу відмічалася у 2005, 1981 та 2009 рр. – 11, 10 та 9 днів, відповідно. У 1979, 2012 та 2019 рр. не виявлено жодного дня із сильним снігом. Аналіз міжрічної мінливості продемонстрував відносне збільшення випадів сильного снігу з 2000 по 2009 рр. та з 2013 по 2018 рр. В цілому за період дослідження кількість днів із сильним снігом збільшувалась, що наявно демонструє лінійний тренд (рис. 2б).

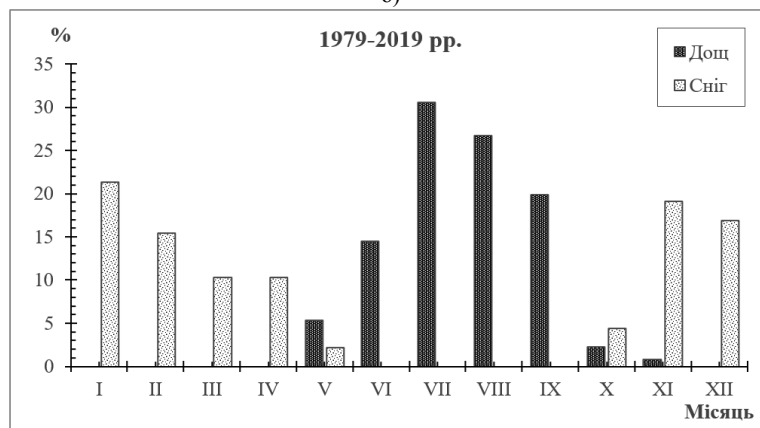
Сильні опади мають яскраво виражений сезонний хід: переважна кількість дощів (92%) спостерігалася з червня по вересень, а снігопадів (73%) – з листопаду по березень. Найбільша повторюваність дощів припадала на липень та серпень – 31 та 27 %, а снігопади найчастіше утворювалися у січні та листопаді – 21 та 19 %.



а)



б)



в)

Рис. 2 – Повторюваність сильних та надзвичайних опадів (а – дощ, б – сніг) для території України за період 1979-2019 рр. та їх сезонна мінливість (в) у %

Fig. 2 - Recurrence of heavy and extreme precipitations (a – rainfall, б – snowfall) for the Ukraine territory for the period 1979-2019 and their seasonal variability (c) in percentage

Для періоду дослідження виявлена наявність сильних снігопадів у квітні та жовтні, що можна вважати ознакою змін клімату та зростання кіль-

кості екстремальних явищ погоди [5,6].

Також за результатами дослідження отримано просторовий розподіл кількості опадів за різни-

ми градаціями, а на рис.3 а,б представлені градації, на які припадало максимальне значення кількості опадів для квадрату сітки. Дощі з кількістю опадів > 50 мм/12 год спостерігалися практично над всією територією України, а зони максимумів повторюваності (4-5 та 5-6 днів за період дослідження) приходились на район Карпатських гір, Донецького краю, Подільської височини та південний захід країни. Сильні снігопади з кількістю опадів > 20 мм/12 год найчастіше виникали у Карпатському регіоні (до 20-26 днів за період дослідження), другий відносний максимум географічного розподілу виявився на південному заході країни (до 9-10 днів за період дослідження).

Щодо просторового розподілу інтенсивності (рис. 3в) сильного дощу, то осередок з максимальними значеннями інтенсивності опадів (120-133 мм/12 год.) позначився на узбережжі Азовського моря в районі Бердянська та Маріуполя, можливо внаслідок пересування південних та над Чорним та Азовським морями. Імовірно проходження південних та південно-західних циклонів та їх переміщення на узбережжя сформувало вузьку, витягнуту з південного заходу на північний схід, зону, де спостерігалися дощі з інтенсивністю до 90-100 мм. Також яскраво виділяються ще осередки з інтенсивними дощами (70-85 мм) – Чернівецька область та лінія Дніпро-Харків.

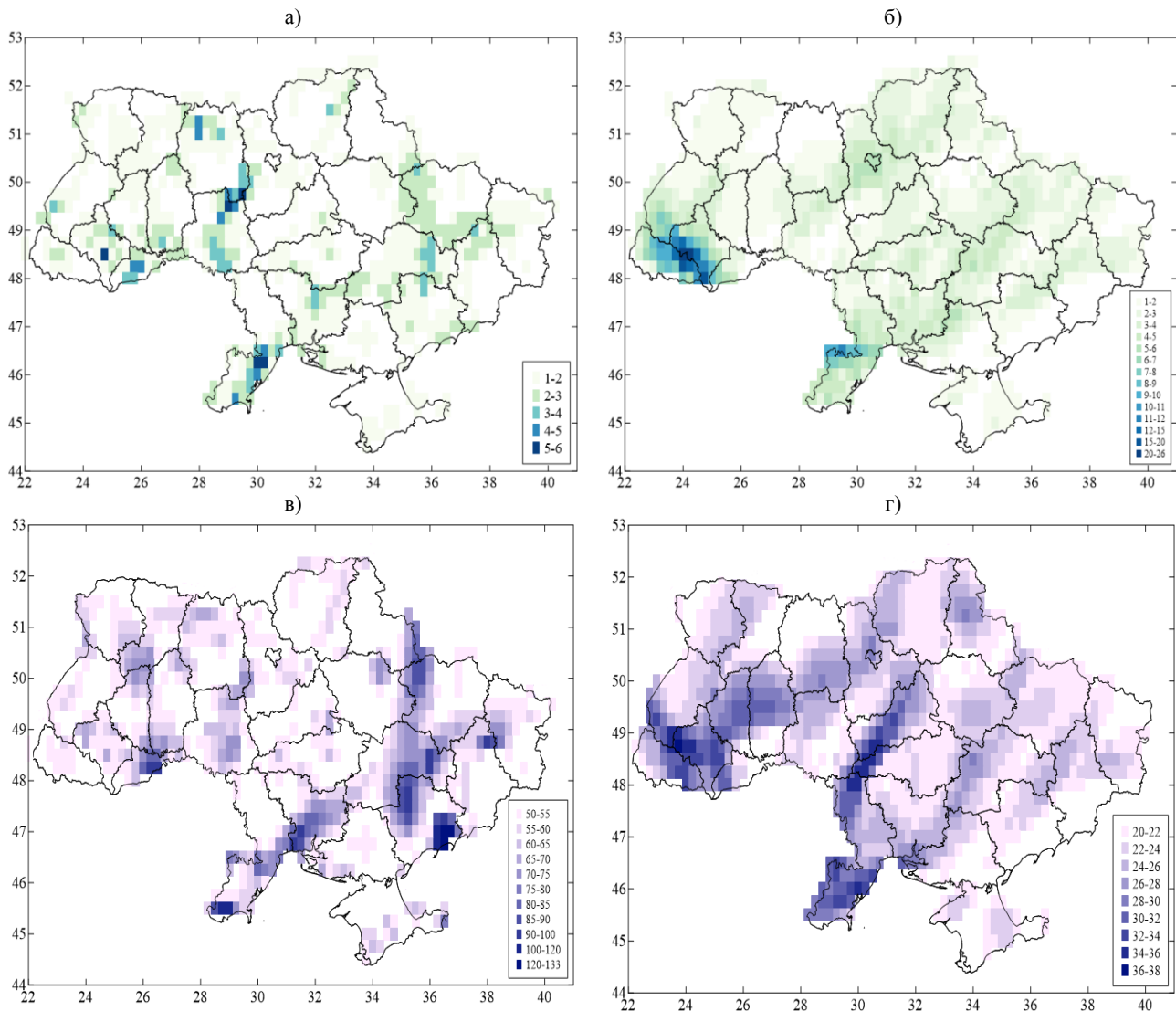


Рис. 3 – Просторовий розподіл кількості днів з сильними та надзвичайними опадами (а – дощ, б – сніг) та їх інтенсивності за градаціями (в – дощ, г – сніг) над Україною за період 1979-2019 рр.

Fig. 3 - Spatial distribution of the number of days with heavy and extreme precipitation (a - rainfall, b - snowfall) and their intensity by gradations (c - rainfall, d - snowfall) over Ukraine for the period 1979-2019

Найсильніші снігопади (34-38 мм/12 год) переважно утворювалися в районі Карпат (рис. 3г), також інтенсивний сніг спостерігався на південний захід від Подільської височини та над південною частиною Одещини (30-34 мм/12 год).

Отже, просторовий розподіл утворення сильних та надзвичайних опадів за даними реаналізу ERA5 суттєво не відрізняється від географічної локалізації сильних опадів за даними метеорологічних спостережень [5-8] та, вірогідно, пояснюється впливом орографії та типовими траєкторіями переміщення циклонів.

Застосування синоптичної класифікації великомасштабних атмосферних процесів Б. Л. Дзердзеєвського та співавторів [17] дозволило виділити переважаючі типи циркуляції та ЕЦМ, під впливом яких створювалася синоптична ситуація, сприятлива до посилення опадів. Встановлено, що найчастіше випадіння сильних дощів на території України спостерігалось, в основному (38%) при меридіональній циркуляції ЕЦМ 13л, а частка інших ЕЦМ не перевищувала 5% (13з, 12бл, 12а, 10б, 9а). Для ЕЦМ 13л характерні значні горизонтальні баричні градієнти, що створюють сприятливі умови для формування метеорологічних екстремумів (рис. 4а).

Сильні снігопади переважно виникали при

тривалому збереженні меридіональної північної форми циркуляції, тобто домінували типи ЕЦМ 12бз, 12а (18, 15% відповідно), основною ознакою яких є утворення 2-4 блокуючих процесів та 2-4 виходів атлантичних та південних циклонів (рис. 4б).

Випадки з максимальною інтенсивністю дощу (132,8 мм/12 год), згідно даним реаналізу ERA5, спостерігалися з 23 по 27 липня 2008 року, коли відбувався найсильніший паводок в Українських Карпатах за всю історію спостережень на той час.

Протягом цього періоду, погодні умови над Україною формувалися під впливом холодних ділянок арктичного та полярного фронтів, які стаціонували над заходом та центром країни з 21 по 27 липня 2008 року (рис. 5а). Баричне поле визначалося улоговиною малорухомого циклону над з центром над Чорним морем (мінімальний тиск у центрі 1000-1005 гПа) та збереженням інтенсивного антициклону (максимальний тиск у центрі 1025-1030 гПа) над Скандинавським півостровом. Так, над Україною утворилася перехідна зона між баричними утвореннями різного знаку з великими баричними та термічними градієнтами, а також виник висотний циклон над західними областями (рис. 5б).

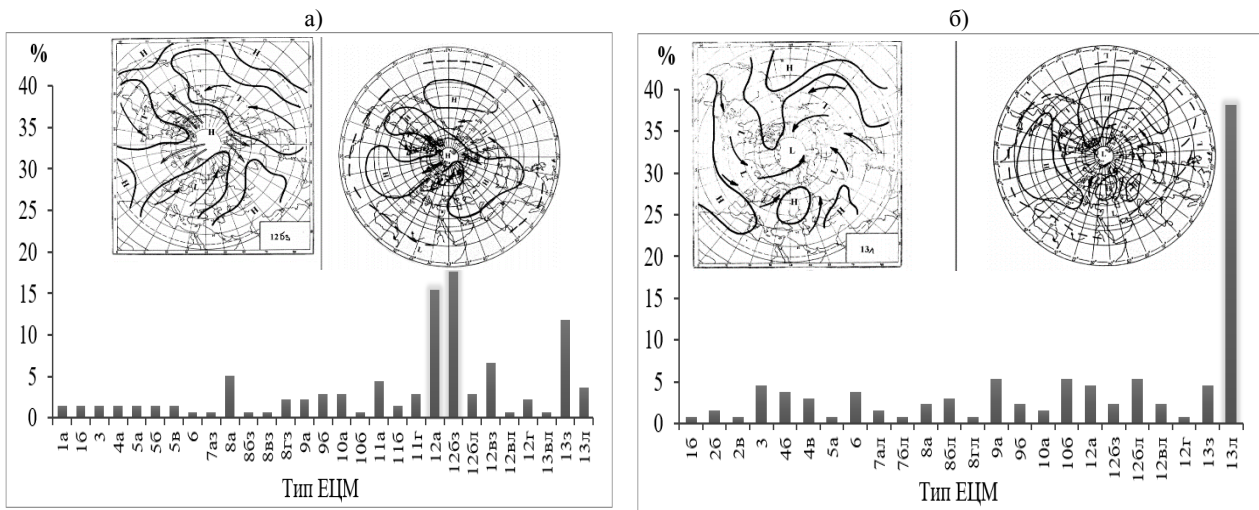


Рис. 4 – Повторюваність (%) типів / підтипів синоптичних процесів при сильних опадах (а – дощ, б – сніг) за період 1979-2019 рр. для території України

Fig. 4 - Recurrence (%) of types and subtypes of synoptic processes at heavy precipitation (a - rainfall, b - snowfall) for the period 1979-2019 for the territory of Ukraine

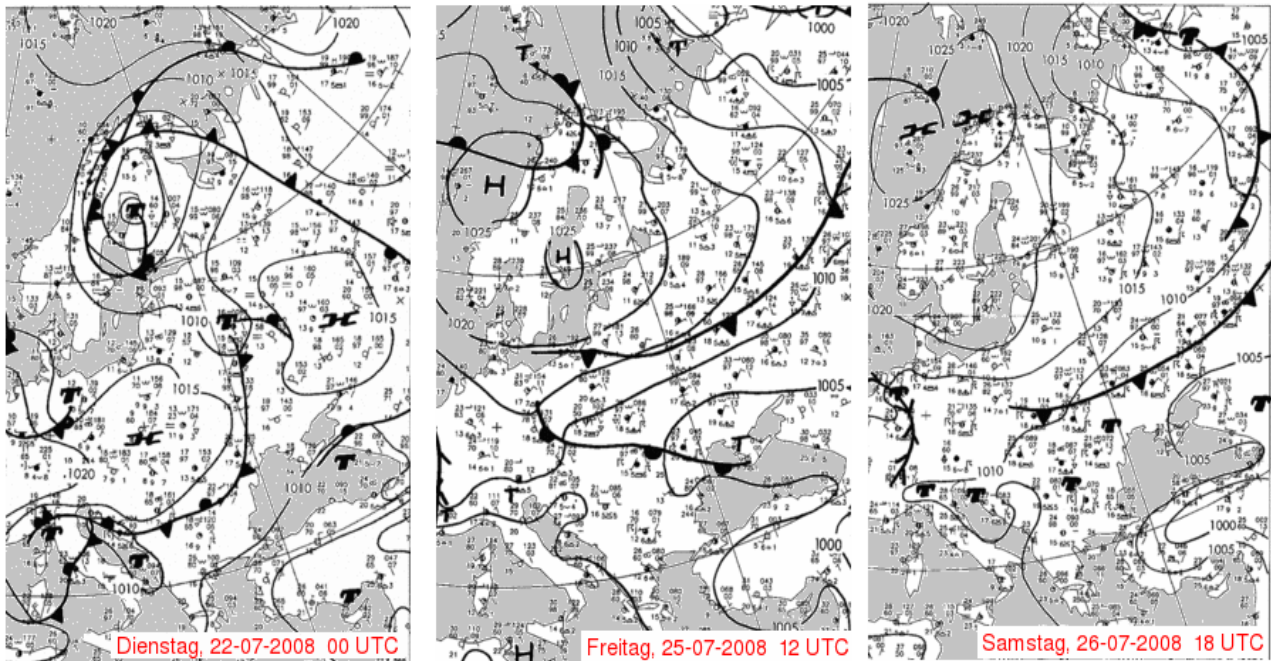


Рис. 5 – Приземний аналіз за 22-26 липня 2008 р.
 Fig. 5 – Surface pressure charts for July 22-26, 2008

4. ВИСНОВКИ

В результаті дослідження з використанням даних атмосферного реаналізу ERA5 за період 1979-2019 рр. для території України виявлено 131 день з дощем та 136 днів зі снігом, коли інтенсивність опадів дорівнювала або перевищувала критерії стихійних метеорологічних явищ II та III рівнів небезпечності.

Визначена наявність тенденції до збільшення кількості сильних снігопадів та зменшення сильних дощів за останні 40 років в Україні.

Сезонний хід утворення сильних та надзвичайних дощів за даними реаналізу характеризувався максимумом у липні та серпні (31 та 27 %), а снігопадів – у січні та листопаді (21 та 19 %), що істотно не відрізняється від кліматичних норм за даними метеорологічних спостережень.

Дощі з інтенсивністю більше 50 мм за 12 годин спостерігалися практично над всією територією України, а зони максимумів повторюваності приходились на райони Карпатських гір, Донецького кряжу, Подільської височини та південний захід країни. Сильні снігопади з кількістю опадів більше 20 мм за 12 годин найчастіше виникали у Карпатському регіоні.

За географічним розподілом максимальної інтенсивності опадів визначається осередок з інтенсивністю дощу 120-133 мм/12 год біля узбережжя Азовського моря, тоді як ареали найсильніших снігопадів (34-38 мм/12 год.) відмічалися

в районі Карпат.

Просторовий розподіл кількості днів та максимальної інтенсивності сильних опадів у вузлах регулярної сітки суттєво не відрізняється від кліматичних закономірностей для метеорологічних спостережень.

Виявлено, що опади у вигляді дощу та снігу переважно посилювались під впливом ЕЦМ 13л та 12бз синоптичної класифікації атмосферних процесів Б.Л. Дзержевського.

Наведені у цій статті результати були отримані за допомогою чисельного моделювання Європейського центру середньострокових прогнозів (ECMWF), які є надійним джерелом вихідних даних у сучасних дослідженнях. Отже, надалі, використовуючи ресурси ECMWF, слід з'ясувати фізичні механізми утворення сильних опадів через моделювання процесів переносу вологи над Атлантико-Європейським сектором.

ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку Хохлову В.М. за допомогу у формулюванні гіпотези дослідження, критичні зауваження в ході роботи та цінні поради.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: IPCC, 2014.
2. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. URL: <https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-dobu/111143.html> (дата звернення: 11.09.2020).
3. *Copernicus Climate Data Store. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present.* URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form> (дата звернення 10.03.20 р.).
4. Настанова з метеорологічного прогнозування / Гумоненко Л. В., Жук Н. Г., Савченко Л. І. та ін. Київ, 2019. 35 с.
5. Balabukh V. O. et al. Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. *Extreme Weather* / Edited by P. J. Sallis. London, UK: IntechOpen, 2018. Pp. 85-106.
6. Семергей-Чумаченко А. Б., Озимко Р. Р. Сильні дощі та зливи у Закарпатській області як стихійні метеорологічні явища (1999-2018 рр.). *Український географічний журнал.* 2019. №4(108). С. 11-17.
7. Клімат України: монографія / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ: Вид-во Раєвського, 2003, 343 с.
8. Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 рр.) / за ред. В. М. Ліпінського, В. М. Бабіченко. Київ: Ніка-Центр, 2006, 311 с.
9. Осадчий В. І., Бабіченко В. М. Динаміка стихійних метеорологічних явищ в Україні. *Український географічний журнал.* 2012. №4. С. 8-14. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-2012-4-08_0.pdf
10. Балабух В. О. Мінливість дуже сильних дощів і сильних злив в Україні. *Наук. праці УкрНДГМІ.* 2008. Вип. 257. С. 61-72.
11. Мартазінова В. Ф., Щеглов А. А. Характер екстремальних опадів початку ХХІ століття на території України. *Український гідрометеорологічний журнал.* 2018. №22. С. 36-45. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04>
12. Хохлов В. М., Уманська О. В., Ель Хадрі Юсеф та ін. Виявлення можливості застосування даних реаналізу в наукових дослідженнях. *Тези доповідей I Всеукр. гідрометеорологічного з'їзду з міжнародною участю, 22-23 березня.* Одеса: ТЕС, 2017. С. 235-236.
13. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).* URL: <https://www.ecmwf.int/> (дата звернення: 10.03.2020).
14. Miguel Nogueira. Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences. *Journal of Hydrology.* 2020. Vol. 583. Pp. 1-17 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124632>
15. Tymofeyev V. E., Scheglov A., Skorotyana Yu. On the extreme summer precipitation in Ukraine over the last decades. *Proceedings of the 7th European Conference on Severe Storms (ECSS2013),* 3-7 June. Helsinki, Finland, 2013. URL: <https://www.essl.org/ECSS/2013/programme/abstracts/144.pdf>
16. Guide to Climatological Practices. *WMO.* 2018. No. 100, pp. 89-91. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9868 (дата звернення: 15.09.2020).
17. *Календарь последовательной смены ЭЦМ по периодам.* URL: <http://atmospheric-circulation.ru> (дата звернення: 20.04.2020).

REFERENCES

1. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (2014.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: IPCC.
2. *Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii [The State Emergency Service of Ukraine].* Available at: <https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-dobu/111143.html> (accessed: 11.09.2020). (in Ukr.)
3. *Copernicus Climate Data Store. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present.* Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form> (Accessed: 10.03.20).
4. Humonenko, L.V., Zhuk, N.H., Savchenko, L.I. et al. (2019). *Nastanova z meteorolohichnoho prohnzuvannia [Meteorological forecasting guide.]* Kyiv. (in Ukr.)
5. Balabukh, V.O. et al. (2018). Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. In: Sallis, P.J. (ed.). *Extreme Weather.* London, UK. IntechOpen, pp. 85-106.
6. Semerhei-Chumachenko, A.B. & Ozymko, R.R. (2019). Distribution of storm rains in the Transcarpathian region for the last twenty-years (1999-2018). *Ukrayins'kyi heohrafichnyi zhurnal [Ukrainian Geographical Journal],* 4(108), pp.11-17. (in Ukr). <https://doi.org/10.15407/ugz2019.04.011>
7. Lipinskiy, V.M., Diachuk, V.A. & Babichenko, V.M. (eds). (2003). *Klimat Ukrainy [Climate of Ukraine].* Kyiv: Raevsky Publ. (in Ukr)
8. Babichenko, V.M. & Lipinskiy, V.M. (eds). (2006). *Stykhiini meteorolohichni yavyschcha na terytorii Ukrainy za ostannie dvadtsiatyrichchia (1986-2005 rr.) [Extreme meteorological events in Ukraine 1986-2005].* Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
9. Osadchy, V.I. & Babichenko, V.M. (2012). Dynamics of adverse meteorological phenomena in Ukraine. *Ukrayins'kyi heohrafichnyi zhurnal. [Ukrainian Geographical Journal],* 4, pp. 8-14. (in Ukr.) Available at: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-2012-4-08_0.pdf
10. Balabukh, V.O. (2008). Minlyvist duzhe sylnykh doshchiv i sylnykh zlyv v Ukraini [Variability of very heavy rains and heavy rainfalls in Ukraine]. *Nauk. Pratsi UkrNDHMI [Scientific works of UkrSEHMI],* 257, pp. 61-72. (in Ukr.)
11. Martazinova, V.F. & Shcheglov, A.A. (2018). [Nature of extreme precipitation over Ukraine in the 21st century]. *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal],* 22, pp. 36-45. (in Russ.). <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04>
12. Khokhlov, V.M., Umanska, O.V., El Hadri, Y. et al. (2017). [Identifying the possibility of using reanalysis data in research]. *Tezy dopovidei 1th Vseukrainskoho hidrometeorolohichnoho zizdu z mizhnarodnoiu uchastiu [Theses of reports of the First All-Ukrainian Hydrometeorological Congress with International Participation],* 22-23 March. Odessa, pp. 235-236. (in Ukr.)
13. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).* Available at: <https://www.ecmwf.int/> (Accessed: 10.03.2020).

14. Miguel Nogueira. (2020). Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences. *Journal of Hydrology*, 583, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124632>
15. Tymofeyev, V.E., Scheglov, A., Skorotyana, Yu. (2013). On the extreme summer precipitation in Ukraine over the last decades. *Proceedings of the 7th European Conference on Severe Storms (ECSS2013)*. Helsinki, Finland. Available at: <https://www.essl.org/ECSS/2013/programme/abstracts/144.pdf>
16. Guide to Climatological Practices. *WMO*. 2018. No. 100, pp. 89-91. Available at: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9868 (Accessed: 15.09.2020).
17. *Kalendar' posledovatel'noy smeny ECM po periodam [Calendar of consecutive ECM changes by periods]*. Available at: <http://atmospheric-circulation.ru> (Accessed: 20.04.2020). (in Russ.)

SPATIAL–TEMPORAL DISTRIBUTION OF HEAVY PRECIPITATION OVER UKRAINE DURING 1979-2019 ACCORDING TO THE ERA5 REANALYSIS

A. B. Semerhei-Chumachenko,
K. L. Slobodianyuk

*Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine,
asemerhey2016@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8718-4073>
<https://orcid.org/0000-0003-1118-4469>*

The paper presents the results of research of heavy and extreme precipitation in the form of rain (> 50 mm / 12 h) and snow (> 20 mm / 12 h) using the data from the atmospheric reanalysis ERA5 for the period of 1979-2019. According to the data of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts obtained through the numerical modeling and resulting from the data assimilation at the nodes of a regular grid with a spatial resolution of 0,25°×0,25°, there are 131 and 136 days with rain and snow during which precipitation intensity reached the criteria of meteorological phenomena of the 2nd and 3rd levels of danger. It was discovered that the last 40 years in Ukraine proved to have a tendency of an increased number of cases of heavy snowfall, and a slightly decreased number of heavy rains.

The research pays considerable attention to the spatial-temporal analysis of the frequency and intensity of heavy rainfall with consideration of geographical factors. It determines the seasonal course of heavy and extreme precipitation, the maximum and minimum values of which did not differ from the climatic standard values observed during meteorological observations. Rainfalls with precipitation rates of more than 50 mm over 12 hours were observed almost over the entire territory of Ukraine and the maximum frequency zones were detected over the Carpathian Mountains, Donetsk Ridge, Podolsk Upland, and the south-western part of the country. Heavy snowfalls with more than 20 mm precipitation over 12 hours mostly occurred in the Carpathian region. The analysis of the geographical distribution revealed a center with maximum values of rain intensity (120-133 mm over 12 h) off the coast of the Sea of Azov, and the heaviest snowfalls (34-38 mm over 12 h) mainly formed in the Carpathian region.

The paper established the types of elementary circulation mechanisms of Dzerdzhevsky's synoptic classification of Northern Hemisphere atmospheric circulation. These types, when continuous in nature, resulted in a significantly increased precipitation in the form of rain and snow.

According to the reanalysis data, cases with the maximum rain intensity were found over the period of 23 to 27 July 2008 when a catastrophic flood was observed in the Ukrainian Carpathians. This fact indicates that the structure of the field of heavy precipitation over the territory of Ukraine was adequately reproduced by the respective model of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

Keywords: reanalysis data, ERA5, heavy precipitation, extreme precipitation, elementary circulatory mechanisms.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ НАД УКРАИНОЙ ЗА 1979-2019 ГГ. ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5

А. Б. Семергей-Чумаченко,
Е. Л. Слободяник

Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина,
asemergey2016@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8718-4073>
<https://orcid.org/0000-0003-1118-4469>

Представлены результаты исследования сильных и чрезвычайных осадков в виде дождя (> 50 мм/12 ч) и снега (> 20 мм/12 ч) с использованием данных атмосферного реанализа ERA5 за период 1979-2019 гг. По информации Европейского центра среднесрочных прогнозов, полученной с помощью численного моделирования, которая является результатом ассимиляции данных в узлах регулярной сетки с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, на территории Украины обнаружено 131 и 136 дней с дождем и снегом, с интенсивностью осадков выше критериев стихийных метеорологических явлений II и III уровней опасности. Выяснено, что за последние 40 лет в Украине наблюдалась наглядная тенденция к увеличению количества случаев сильных снегопадов, а количество сильных дождей незначительно уменьшалось.

Значительное внимание уделяется пространственно-временному анализу повторяемости и интенсивности сильных осадков с учетом географических факторов. Определен сезонный ход образования сильных и чрезвычайных осадков, максимумы и минимумы которого не отличались от климатических норм по данным метеорологических наблюдений. Дожди с количеством осадков более 50 мм за 12 часов наблюдались практически над всей территорией Украины, а зоны максимумов повторяемости приходились на районы Карпатских гор, Донецкого кряжа, Подольской возвышенности и юго-запад страны. Сильные снегопады с количеством осадков более 20 мм за 12 часов зачастую возникали в Карпатском регионе. Анализ географического распределения обнаружил очаг с максимальными значениями интенсивности дождя (120-133 мм/12 ч.) у побережья Азовского моря, а сильные снегопады (34-38 мм/12 ч) преимущественно образовывались в районе Карпат.

Установлены типы элементарных циркуляционных механизмов синоптической классификации атмосферных процессов северного полушария Б. Л. Дзердзеевского, при сохранении которых осадки в виде дождя и снега значительно усиливались.

Случаи с максимальной интенсивностью дождя по данным реанализа обнаружены с 23 по 27 июля 2008 года, когда наблюдался катастрофический паводок в Украинских Карпатах, что свидетельствует об адекватном воспроизведении моделью Европейского центра среднесрочных прогнозов структуры поля сильных осадков над территорией Украины.

Ключевые слова: данные реанализа; ERA5; сильные осадки; чрезвычайные осадки; элементарные циркуляционные механизмы.

Подання до редакції : 09. 11. 2020
Надходження остаточної версії : 02. 12. 2020
Публікація статті : 17. 12. 2020

УДК: 551.582.

КЛІМАТИЧНІ ЗМІНИ ТА ЇХ ВПЛИВ НА РЕЖИМ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ І ОПАДІВ В УКРАЇНІ У ПЕРЕХІДНІ СЕЗОНИ

В. М. Хохлов, Г. О. Боровська, М. С. Замфірова

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, khokhlovv@odeku.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-8315-8636>

Оскільки сучасні дослідження свідчать про кліматичні зміни у всіх регіонах нашої планети, в тому числі й на території України, частота яких стрімко зростає протягом останніх десятиліть (зокрема відхиленням температури та деяких інших метеорологічних параметрів від значень кліматичної норми), їх вивчення вкрай важливе. Адже вони можуть призвести до змін характеру розподілу атмосферних опадів, що може спричинити недостатнє або надлишкове зволоження певних регіонів; тривалості вегетаційного періоду; водних ресурсів місцевого стоку; зменшення тривалості залягання стійкого снігового покриву та ін. Більшість наукових робіт за останні роки описують зміни в розподілі температурних характеристик та режимі опадів, адже вони є одними з основних показників стану кліматичної системи. Тому дана стаття має на меті виявлення особливостей змін температури повітря та опадів для всієї території України з 2021 по 2050 роки за результатами 16 симуляцій ансамблю моделей CORDEX на основі сценарію RCP4.5. Проект CORDEX є найсучаснішою симуляцією майбутнього клімату і має роздільну здатність ~12,5 км у горизонтальній площині, що дозволяє якнайкраще змоделювати досліджувані характеристики. Він об'єднує кліматичні проєкції в регіональному масштабі, які створені з використанням статистичних та динамічних методів. Отримані результати представлені для 177 міст України, які в даний час складають основу сучасної моніторингової мережі.

Виявлено, що кількість днів з опадами ≥ 5 мм в перехідні сезони зростатиме в середньому на 1-3 дні на місяць в залежності від регіону. Максимальні значення повторюваності кількості днів з опадами ≥ 5 мм спостерігаються на заході та поступово зменшуються в південному напрямку. У порівнянні з 1961–1990 роками, найбільш суттєвих змін зазнає кількість морозних днів з температурою повітря $\leq 0^\circ\text{C}$, яка відчутно зменшується за увесь досліджуваний період з півночі на південь. В квітні та жовтні для південних областей України розглянутий параметр дорівнює 0, це означає, що в дані місяці температура повітря для цих регіонів матиме додатні значення.

З вище сказаного прослідковується тенденція до потепління в перехідні сезони та зміна характеру вологозабезпеченості території України у найближчі тридцять років.

Ключові слова: зміна клімату; температура повітря; опади; CORDEX

1. ВСТУП

Впродовж останніх десятиріч ми стали свідками змін часово-просторових характеристик переважної кількості метеорологічних величин, які більшість науковців пояснюють глобальними змінами кліматичної системи у зв'язку з антропогенною діяльністю людства [1,2]. Дані зміни спричинили часті прояви екстремальних погодних явищ, невластивих для нашої місцевості. Згідно П'ятого Національного повідомлення України з питань зміни клімату [3] на території нашої держави збільшились: амплітуда коливань температури повітря за короткі проміжки часу; кількість випадків затоплення значних ділянок суходолу; чисельність та інтенсивність стихійних лих (повені, зсуви ґрунту, лісові пожежі) та

нетипових для сьогодення екстремальних погодних явищ (тривалі зливи, засухи, урагани тощо), що призводять до вагомих економічних збитків та втрат серед населення. Тому вчені різних країн розробляють найбільш точні механізми прогнозу небезпечних явищ з метою їх попередження, пошуку стратегій пом'якшення та шляхів адаптації до змін клімату [4], і оскільки режим опадів та температури є одними з основних показників стану кліматичної системи, їх дослідження є важливим. Для повноти аналізу слід визначити тенденції змін досліджуваних характеристик, які вже відбулися у минулому, та прогнозу за кліматичними моделями, які можуть бути використані для кількісної оцінки майбутніх кліматичних змін.

Дослідженням температурного режиму та розподілу опадів на території України присвячено значну кількість наукових робіт (див. [5–14]), але деякі з них описують зміни, що вже відбулися [5,6], а інші використовували невелику кількість кліматичних моделей, що не дає змогу висвітлити отримані результати повною мірою. Оскільки зміни режиму температури та опадів на глобальному рівні є інтегральним показником регіональних кліматичних змін, саме тому дослідження глобального клімату доцільно проводити оцінивши кліматичні тенденції регіонального рівня. З цією метою в даній статті використовувались результати моделювання проекту CORDEX [15], які з'явилися в останні роки та представлені великою кількістю моделей (детальніше див. [16]). За рахунок малого кроку сітки в горизонтальній площині дані моделі дозволяють визначити майбутні характеристики з достатньою точністю. На основі вище сказаного, метою дослідження є виявлення змін в режимах температури та опадів в перехідні сезони для території України в регіональному масштабі з 2021 по 2050 рр. за результатами моделювання ансамблю моделей CORDEX, для визначення найбільш уразливих регіонів нашої країни до майбутніх змін клімату.

2. ДАНІ ТА МЕТОДОЛОГІЯ

Для передбачення майбутнього стану кліматичної системи міжурядова група експертів зі змін клімату створила сценарії викидів аерозолів та парникових газів у атмосферу, в основі яких збільшення кількості населення, стрімкий розвиток промисловості, науково-технічного прогресу, землекористування та енергетики [17]. Сценарії SRES (Спеціальний звіт про сценарії викидів) згруповані в чотири «сім'ї» (A1, A2, B1, B2) і в кожній з них дослідники розробили відмінні між собою сценарії майбутнього, беручи за основу динаміку глобальних викидів та концентрацію парникових газів в атмосфері [18].

В п'ятій доповіді IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), яка висвітлює найактуальніші наукові досягнення про клімат Землі, розглядалося чотири сценарії, що за різнопланових умов розвитку людства прогнозують концентрацію парникових газів та аерозолів до 2100 року. Їхні скорочені назви (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 та RCP8.5) відповідають рівню випромінювальної здатності, яку буде досягнуто у 2100 році в порівнянні з 1750 роком (+2,6, +4,5, +6,0 та +8,5 Вт/м² відповідно) [19]. Науковці прогнозують, що пік викидів парникових газів у найсп-

риятливішому сценарії RCP2.6 відбудеться в період 2010-2020 років, після чого прогнозується їх спад. Пік викидів у сценарії RCP4.5 передбачають у 2030-2050 роки, а RCP6.0 – на 2070-2080 роки. Найнесприятливіший сценарій RCP8.5 прогнозує ріст концентрації парникових газів протягом століття [19,20].

Опираючись на вище сказане, в даній статті для розрахунку проєкції майбутніх опадів та температури застосовувалися результати моделювання проекту CORDEX з використанням 16 симуляцій, де за основу з чотирьох можливих сценаріїв брали один - RCP4.5, а для виявлення змін у середніх значеннях були застосовані спеціальні кліматичні індекси, рекомендовані Всесвітньою програмою з дослідження клімату [21], а саме FD (Морозна доба – доба з $TN < 0^{\circ}\text{C}$) та RR5 (Дощова доба – доба з $RR \geq 5$ мм).

Для кращого аналізу отримані результати порівнювалися з відповідними даними кліматичного кадастру України [22] за період з 1961 по 1990 роки. Саме тому розрахунки проводилися лише для трьох місяців (оскільки дані інших відсутні в кадастрі), а саме березня, квітня та жовтня, які відповідають перехідним сезонам, на тридцятирічний період з 2021 по 2050 роки для 177 метеорологічних станцій на території України.

3. ОПИС ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як видно з рис. 1, кількість днів з температурами 0°C та нижче за базовий період найбільше спостерігається у березні (оскільки ще зберігається зимовий характер розподілу температури) на південній межі Івано-Франківської та Закарпатської областей (ст. Пожижевська) і становить 26,3 днів та на південному заході Чернівецької області (ст. Селятин) з максимумом 28,5 днів (рис. 1а). Даний розподіл пояснюється кількістю променистої енергії, циркуляційними особливостями та близьким розташуванням Карпатських гір. Також вагомі значення відзначаються на півночі Чернігівської області (ст. Покошичі) – 25,2 днів за місяць. Найнижчі величини локалізуються на південному узбережжі Криму, мінімальне значення складає 4,4 дні за місяць (ст. Ялта), що обґрунтовується впливом відносно теплого Чорного моря та Кримських гір, які утворюють природний захист від вторгнення холодних повітряних мас з півночі та північного сходу.

У квітні (рис. 1б) відзначається інтенсивне підвищення температури повітря, про що

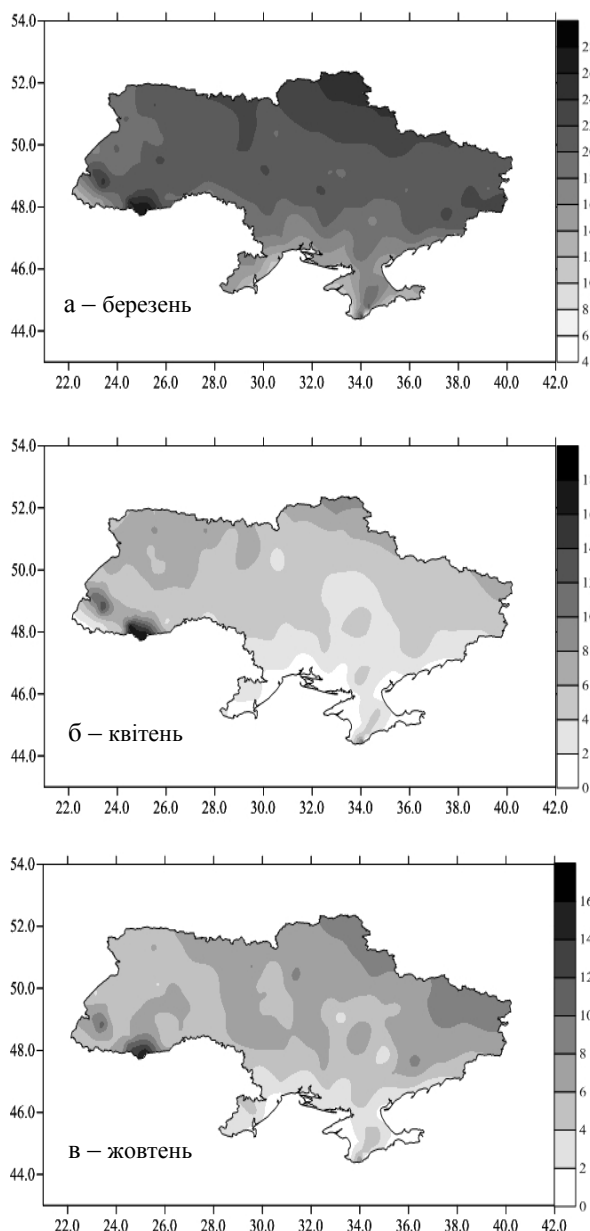


Рис. 1 – Кількість днів за місяць з температурою повітря $\leq 0^{\circ}\text{C}$ за даними кадастру 1961 – 1990 рр. для 177 станцій території України

Fig. 1 - Number of days per month with air temperature $\leq 0^{\circ}\text{C}$ according to the cadastre 1961 - 1990 for 177 stations of the territory of Ukraine

свідчить суттєве зменшення кількості морозних днів по всій країні в середньому на 8-12 днів. Зростання кількості безморозних днів відбувається в широтному напрямку. Максимум досліджуваного параметру знаходиться на ст. Пожижевська зі значенням 17,9 днів на місяць, в той час як на півдні Одеської, Миколаївської, Херсонської, Запорізької областей та узбережжі Криму дні з температурою повітря 0°C та нижче взагалі відсутні. Ситуація у жовтні (рис. 1в) мало відрізняється від квітневої. Більшість днів з від'ємними температурами, як і в

березні, спостерігається в Селятині – 16,2. В середньому на досліджуваній території дане значення коливається від 4 до 10 днів за місяць. На узбережжі Одеської області та в Криму холодні дні відсутні.

Результати моделювання (рис. 2) показують помітне зменшення досліджуваної характеристики за увесь розглянутий період. Так у березні (рис. 2а) відзначається поступове зменшення

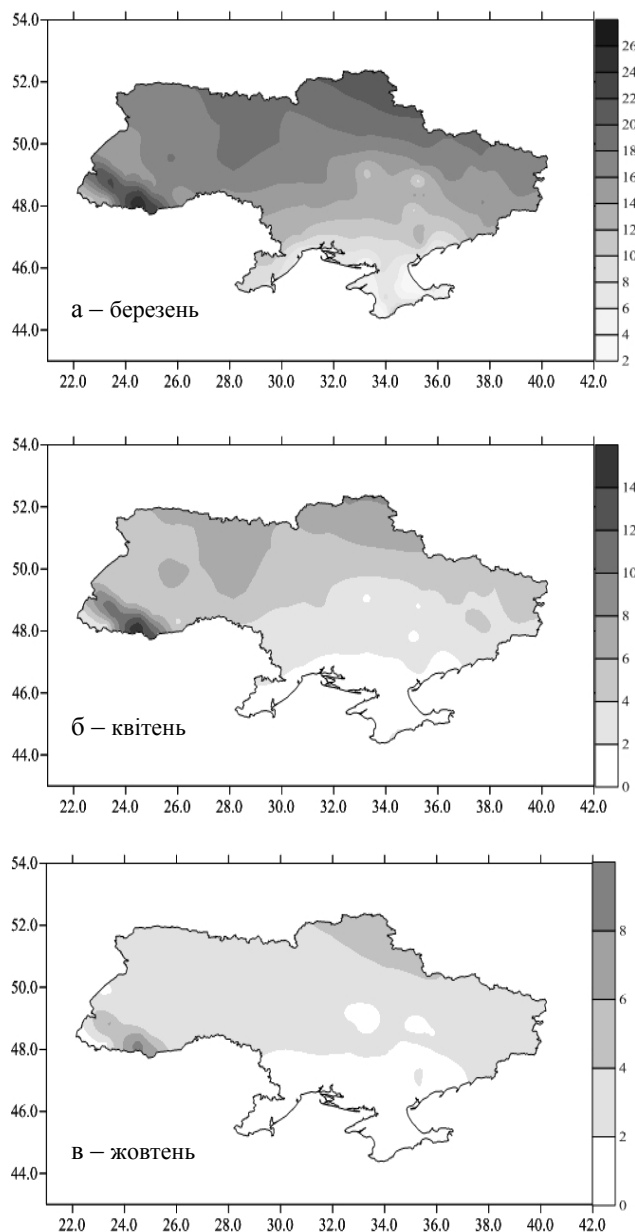


Рис. 2 – Кількість днів за місяць з температурою повітря $\leq 0^{\circ}\text{C}$ за період 2021-2050 рр. для 177 станцій території України за результатами ансамблю 16 моделей проекту CORDEX

Fig. 2 - Number of days per month with air temperature $\leq 0^{\circ}\text{C}$ for the period 2021-2050 for 177 stations of the territory of Ukraine according to the results of the ensemble of 16 models of the CORDEX project

кількості морозних днів з півночі на південь в широтному напрямку. Якщо за базовий період середня їх кількість по усій території України (за винятком крайнього півдня) становила 16 – 22 дні, то у майбутній проекції для північної частини склала 18 – 21, в центральній 10 – 16, на півдні до 8 днів за місяць. Максимум залишився на вище згаданій станції (25,5 днів), а мінімум (2 дні) прогнозується у Севастополі.

Помітно зросла зона з додатними температурами повітря у квітні (рис. 2б), захопивши південь країни та Кримський півострів. На решті території кількість морозних днів варіюватиме від 2 до 6 за місяць і лише в районі Українських Карпат – 10-14 днів.

Найбільш виразні зміни відображаються восени, а саме у жовтні (рис. 2в), де кількість днів з від'ємними температурами зменшується у двічі. Максимум відзначається на ст. Пожижевська та складає 8,9 днів. На більшій території країни цей показник складає 2 дні, на півночі Чернігівської та Сумської областей – 4, в Карпатах – 6-8 днів, а в Одеській, Миколаївській, Херсонській, Запорізькій областях, частині Кіровоградської і Дніпропетровської області, в Криму та на крайньому заході Закарпатської дорівнює нулю.

Як зазначалось вище, одним з важливих показників, який може свідчити про кліматичні зміни, та й загалом про стан кліматичної системи, є режим опадів. Тому далі розглянемо можливі зміни в режимі зволоження в найближчі тридцять років для території України.

На рис. 3 представлені карти кількості днів з опадами 5 мм і більше за базовий період. Як видно, звичному розподілу кількості вологих днів, що характерний для нашої країни за даними кадастру, властиві максимальні значення повторюваності на заході держави, в районі Українських Карпат (6-7 днів в залежності від місяця), що пояснюється особливостями рельєфу, адже у гірських районах виникає вимушене упорядковане підняття повітряних потоків, що сприяє розвитку циклогенезу.

На решті території число вологих днів коливається від 1 до 5, зменшуючись в південному напрямку (винятком є Кримські гори, де досліджувана характеристика варіює від 2 до 4 днів за досліджуваний період). Тобто на рівнинах північного заходу країни опадів випадає більше, а найменша кількість спостерігається на узбереж-

жі Чорного моря. Прослідковується поступове зменшення кількості днів з опадами із заходу і північного заходу на південь та південний схід.

Отримані результати моделювання (рис. 4) повторюють звичний розподіл кількості опадів притаманний для нашої країни. Однак можна відзначити незначний ріст з кількістю вологих днів ≥ 5 мм за розглянутий трьохмісячний період.

Так у березні (рис. 4а) максимум з 6,1 днів на ст. Пожжевська зростає до 9,2 на ст. Рахів, а в Кримських горах з 4,4 до 6,8 днів.

На решті території в залежності від місяця та регіону зростання відбувається на 1-2 дні.

У жовтні (рис. 4в) спостерігається ріст даного параметру на заході Кримського півострову на 2-3,5 дні, що можна пов'язати з посиленням циклонічної діяльності над Середземним морем та послаблення і припинення бризової циркуляції в цьому місяці.

4. ВИСНОВКИ

Кліматичні зміни на території України доведено великою кількістю наукових робіт, частина з яких розглядалась в даній статті. Розрахунки проводилися за допомогою 16 моделей проекту CORDEX за тридцятирічний період з 2021 по 2050 роки для 177 станцій України, які на даний час складають основу сучасної моніторингової мережі. Отримані результати свідчать про те, що характерними рисами майбутнього клімату може стати збільшення кількості днів з опадами на досліджуваній території в перехідні сезони, особливо на півночі та заході та суттєве зменшення морозних днів, зокрема в центральній та південній частині нашої держави. У жовтні температура повітря у всіх південних областях України матиме додатне значення, оскільки, прогнозується відсутність днів з від'ємними температурами.

Дослідження режиму температури та опадів у перехідні сезони для території України дають змогу зробити припущення, що характерний для південного узбережжя Криму середземноморський тип розповсюдиться вглиб країни, що суттєво зменшить континентальність клімату. Проте, щоб упевнитися в даному висновку, потрібно провести більше розрахунків, зокрема задіявши сценарії RCP2.6 і RCP8.5 та дослідивши зимовий і літній сезони.

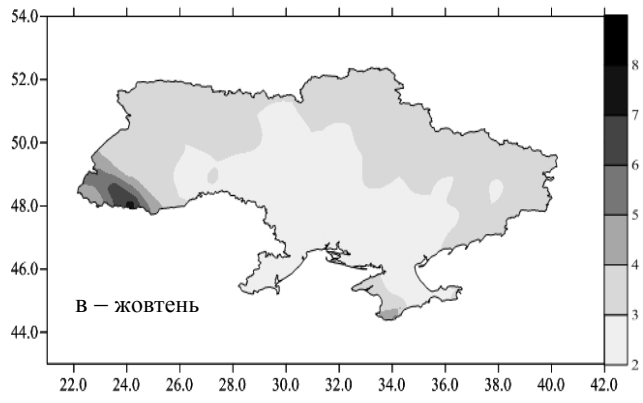
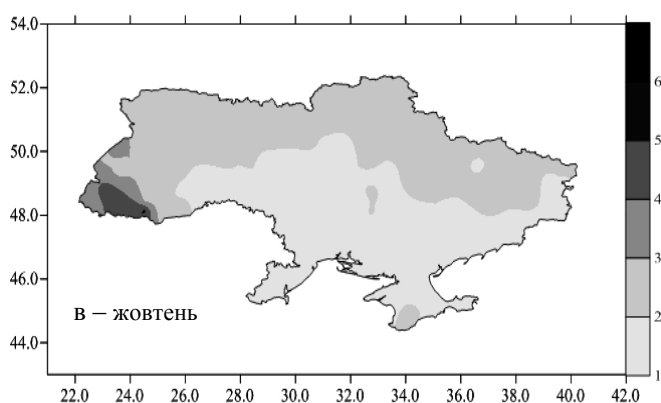
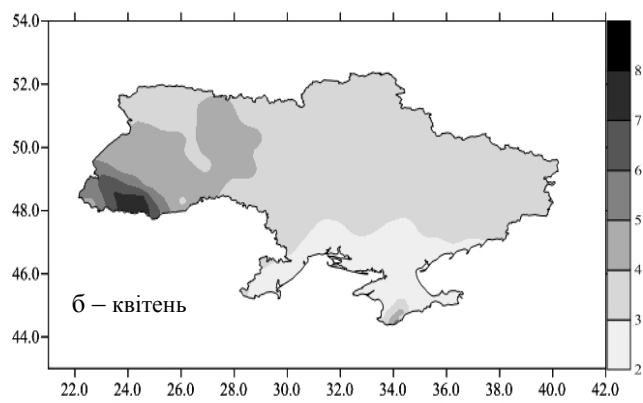
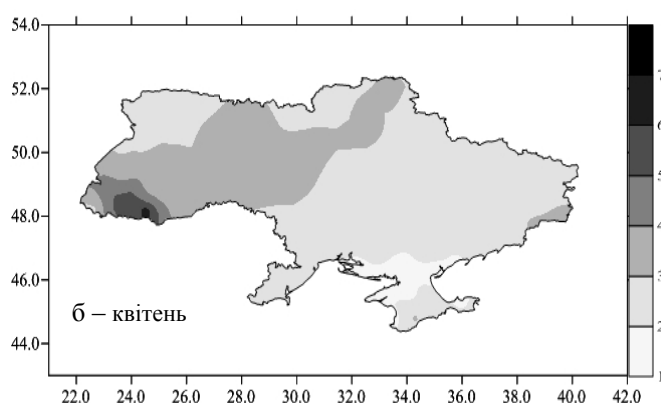
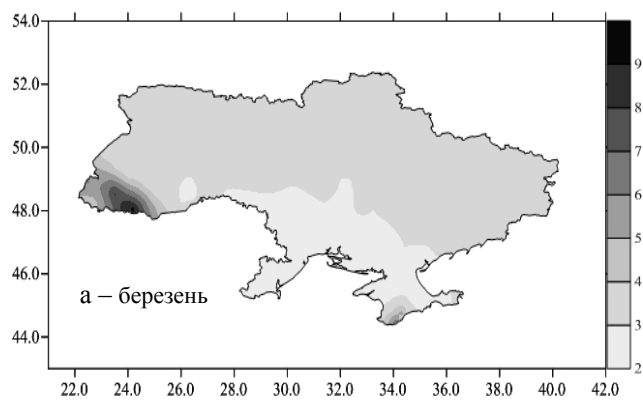
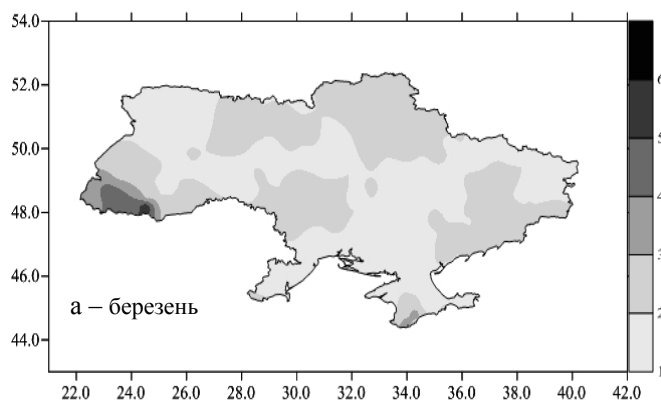


Рис. 3 – Кількість днів за місяць з опадами ≥ 5 мм за даними кадастру 1961 – 1990 рр. для 177 станцій території України

Fig. 3 - Number of days per month with precipitation ≥ 5 mm according to the cadastre 1961 - 1990 for 177 stations in Ukraine

Рис. 4 – Кількість днів за місяць з опадами ≥ 5 мм за період 2021-2050 рр. для 177 станцій території України за результатами ансамблю 16 моделей проекту CORDEX

Fig. 4 - Number of days per month with precipitation ≥ 5 mm for the period 2021-2050 for 177 stations on the territory of Ukraine according to the results of the ensemble of 16 models of the CORDEX project

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
2. Оцінка вразливості до зміни клімату: Україна. Кліматичний форум східного партнерства (КФСП) та Робоча група громадських організацій зі зміни клімату (РГ НУО ЗК), 2014-74с. URL: [https://necu.org.ua/wp-](https://necu.org.ua/wp-content/uploads/ukraine_cc_vulnerability.pdf)

[content/uploads/ukraine_cc_vulnerability.pdf](https://necu.org.ua/wp-content/uploads/ukraine_cc_vulnerability.pdf) (дата звернення 25.10.2020)

3. П'яте Національне повідомлення України з питань зміни клімату, 2009-367с. URL: https://ucn.org.ua/upl/ukr_nc5rev.pdf (дата звернення 20.10.2020)
4. Climate change adaptation policies and plans: A survey in 11 South East European countries / Pietrapertosa F. et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81, Part2. Pp. 3041-3050. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.116>

5. Гребенюк Н. П., Барабаш М. Б. Про зміни температури повітря в містах України у процесі урбанізації. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2004. Вип. 253. С. 148-154.
6. Хохлов В. Н. Количественное описание изменений климата Европы во второй половине XX века. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2007. № 2, С. 35-42.
7. Хохлов В. М., Латиш Л. Г., Цимбалюк К. С. Возможні зміни температурного режиму в Україні у 2011-2025 роках. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2009. Вип. 8, С. 70-78.
8. Латиш Л. Г., Хохлов В. М. Зміни режиму вологовмісту ґрунту в Україні у 2011-2025 роках. *Фізична географія та геоморфологія*. 2009. Вип. 57, С. 43-49.
9. Хохлов В. М., Бондаренко В. М., Латиш Л. Г. Просторовий розподіл аномалій опадів в Україні у 2011-2025 роках. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2009. № 5, С. 54-62.
10. Хохлов В. М., Єрмоленко Н. С. Майбутні зміни клімату та їх вплив на режим опадів та температури в Україні. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. № 16. С. 76-82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10>
11. Проекції приземної температури та відносної вологості повітря в областях України до середини XXI ст. за даними ансамблів регіональних кліматичних моделей / С. В. Краковська та ін. *Геоінформатика*. 2018. № 3(67). С. 62-77.
12. Зміни поля опадів в Україні у XXI ст. за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей / С. В. Краковська та ін. *Геоінформатика*. 2017. № 4(64). С. 62-74.
13. Balabukh V. et al. Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. *Extreme Weather* / Edited by P. J. Sallis. London, UK: IntechOpen, 2018. Pp. 85-106.
14. Добова асиметрія кліматичних змін температури повітря в Україні / В. І. Осадчий та ін. *Український географічний журнал*. 2018. №3 (103). С. 21-30. <https://doi.org/10.15407/ugz2018.03.021>
15. Jacob D. et al. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*. 2014. Vol. 14(2). Pp. 563-578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
16. Замфірова М. С., Хохлов В. М. Режим температури повітря та опадів в Україні в 2021-2050 роках за даними ансамблю моделей CORDEX. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. № 25. С. 17-27. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.02>
17. Степаненко С. М. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України. Одеса: ТЕС, 2015. 520 с.
18. Rummukainen M. Changes in climate and weather extremes in the 21st century. *WIREs Climate Change*. 2012. Pp. 115-129.
19. Прокопенко К. О., Удова Л. О. Сільське господарство України: виклики і шляхи розвитку в умовах зміни клімату. *Економіка і прогнозування*. 2017. № 1. С. 92-107. http://nbuv.gov.ua/UJRN/econprog_2017_1_8.
20. Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research / L. Clarke, J. Edmonds, H. Jacoby et al; Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research. Washington, DC., USA. 2007. 154 p.
21. Klein Tank, A.M.G. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), European Climate Assessment & Dataset (ECA&D) project document, version 5. 2008. 39 p.
22. Кліматичний кадастр України (електронна версія). Київ: Державна гідрометеорологічна служба, УкрНДГМІ, Центральна геофізична обсерваторія, 2006.

REFERENCES

1. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (2014). Geneva, Switzerland: IPCC.
2. *Otsinka vrazlyvosti do zminy klimatu: Ukraina. Klimatychnyi forum skhidnoho partnerstva (KFSP) ta Robocha hrupa hromadskykh orhanizatsii zi zminy klimatu (RH NUO ZK) [Climate change vulnerability assessment: Ukraine. Eastern Partnership Climate Forum (CFEP) and Climate Change NGO Working Group]*. (2014). Available at: https://necu.org.ua/wpcontent/uploads/ukraine_cc_vulnerability.pdf (Accessed: 25.10.2020) (in Ukr.)
3. *Piate Natsionalne povidomlennia Ukrainy z pytan zminy klimatu [Fifth National Communication of Ukraine on Climate Change]*. (2009). Available at: https://ucn.org.ua/upl/ukr_nc5rev.pdf (Accessed: 20.10.2020) (in Ukr.)
4. Pietrapertosa, F. et al. (2018). Climate change adaptation policies and plans: A survey in 11 South East European countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2), pp. 3041-3050. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.116>
5. Hrebenuk, N.P. & Barabash, M.B. (2004). Pro zminy temperatury povitria v mistakh Ukrainy u protsesi urbanizatsii [On changes in air temperature in the cities of Ukraine in the process of urbanization]. *Naukovi pratsi UkrNDHMI [Proceedings of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute]*, 253, pp. 148-154. (in Ukr.)
6. Khokhlov, V.N. (2007). [Quantitative description of European climate change during second half of XX century]. *Ukr. gidrometeorol. zh. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 2, pp. 35-42. (in Russ.)
7. Khokhlov, V.M., Latysh, L.H. & Tsybaliuk, K.S. (2009). [Possible thermal condition changes in Ukraine in 2011-2025]. *Visnik Odes'kogo derzhavnogo ekologichnogo universitetu [Bulletin of Odessa State Environmental University]*, 8, pp. 70-78. (in Ukr.)
8. Latysh, L.H. & Khokhlov, V.M. (2009) [Soil moisture content condition changes in Ukraine in 2011-2025]. *Fizychna heohrafiia ta heomorfolohiia [Physical Geography and Geomorphology]*, 57, pp. 43-49. (in Ukr.)
9. Khokhlov, V.M., Bondarenko, V.M. & Latysh, L.H. (2009). [Spatial distribution of precipitation anomalies in Ukraine in 2011-2025]. *Ukr. gidrometeorol. zh. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 5, pp. 54-62. (in Ukr.)
10. Khokhlov, V.M. & Yermolenko, N.S. (2015). [Future climate change and its impact on precipitation and temperature in Ukraine]. *Ukr. gidrometeorol. zh. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 16, pp. 76-82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10> (in Ukr.)
11. Krakovska, S.V. et al. (2018). [Projections of air temperature and relative humidity in Ukraine regions to the middle of the 21st century based on regional climate model ensembles]. *Heoinformatyka [Geoinformatika]*, 3(67), pp. 62-77. (in Ukr.)
12. Krakovska, S.V. et al. (2017). [Changes in precipitation distribution in Ukraine for the 21st century based on data of regional climate model ensemble]. *Heoinformatyka [Geoinformatika]*, 4(64), pp. 62-74. (in Ukr.)
13. Balabukh, V. et al. (2018). Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. In: Sallis, P.J. (ed.) *Extreme Weather*. London, UK: IntechOpen, pp. 85-106.
14. Osadchyi, V. et al. (2018). Dobova asymetriia

- klimatychnykh zmin temperatury povitria v Ukraini [Daily asymmetry of air temperature changes in Ukraine]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 3(103), pp. 21-30. <https://doi.org/10.15407/ugz2018.03.021> (in Ukr.)
15. Jacob, D. et al. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), pp. 563-578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
16. Zamfirova, M.S. & Khokhlov, V.M. (2020). [Air temperature and precipitation regime in Ukraine in 2021-2050 by CORDEX model ensemble]. *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 25, pp.17-27. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.02>
17. Stepanenko, S.M.(2015). *Klimatychni zminy ta yikh vplyv na sfery ekonomiky Ukrainy [Climate changes and its impact on sectors of the economy of Ukraine]*. Odesa: TES. (in Ukr.)
- 18 Rummukainen, M. (2012). Changes in climate and weather extremes in the 21st century. In: *WIRES Climate Change*, pp. 115-129.
19. Prokopenko, K.O. & Udova, L.O. (2017). Silske gospodarstvo Ukrainy: vyklyky i shliakhy rozvytku v umovakh zminy klimatu [Ukrainian agriculture: challenges and ways of development under the climate change]. *Ekonomika i prohnouzuvannia [Economy and Forecasting]*, 1, pp. 92-107. http://nbuv.gov.ua/UJRN/econprog_2017_1_8
- 20 Clarke, L. et al. (2007). *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research. 154 p.
21. Klein Tank. (2008). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). *European Climate Assessment & Dataset (ECA&D)*, 5, pp. 39.
22. *Klimatychnyi kadastr Ukrainy (elektronna versia) [Climate cadastre of Ukraine (electronic version)]*. (2006). Kyiv: State Hydrometeorological Service, UkrSRHMI, Central Geophysical Observatory. (in Ukr.)

CLIMATIC CHANGES AND THEIR INFLUENCE ON AIR TEMPERATURE AND PRECIPITATION IN UKRAINE DURING TRANSITIONAL SEASONS

V. M. Khokhlov, H. O. Borovska,
M. S. Zamfirova

Odessa State Environmental University,
Ukraine, 65016, Odesa, Lvivska St., 15, khokhlovv@odeku.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-8315-8636>

Since modern research indicates climatic changes in all regions of our planet, including on the territory of Ukraine (in particular, the deviation of temperature and other meteorological parameters from the values of the climatic norm), their study is extremely important. After all, they can lead to changes in the nature of precipitation distribution, the length of the growing season, a decrease in the duration of the stable snow cover, local runoff water resources, etc. Most scientific works in recent years describe changes in the distribution of temperature characteristics and precipitation regime, because they are one of the main indicators of the state of the climate system. Therefore, the purpose of this article is to identify the features of changes in air temperature and precipitation for the entire territory of Ukraine from 2021 to 2050 based on the results of 16 simulations of the ensemble of CORDEX models based on the RCP4.5 scenario. The CORDEX project is a modern simulation of the future climate and has a resolution of ~ 12.5 km in the horizontal plane, which makes it possible to better simulate the characteristics under study. It integrates regional climate predictions that are generated using statistical and dynamic methods. The results obtained are presented for 177 cities of Ukraine, which currently form the basis of a modern monitoring network.

It was found that the number of days with precipitation ≥ 5 mm in transitional seasons increases on average by 1-3 days per month, depending on the region. The maximum values of the frequency of occurrence of the number of days with precipitation ≥ 5 mm are observed in the west and gradually decrease in the south. Compared to 1961-1990, the most significant changes occur with the number of frosty days with an air temperature of $\leq 0^{\circ}\text{C}$, which noticeably decreases during the study period from north to south. In April and October, for the southern regions of Ukraine, the considered parameter is equal to 0, which means that in these months the air temperature for these regions will have positive values.

From the above, there is a tendency towards warming in transitional seasons and a change in the nature of moisture supply to the territory of Ukraine in the next thirty years.

Keywords: climate change; air temperature; precipitation; CORDEX

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЖИМ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ В УКРАИНЕ В ПЕРЕХОДНЫЕ СЕЗОНЫ

В. Н. Хохлов, Г.А. Боровская,
М.С.Замфирова

Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, khokhlovv@odeku.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-8315-8636>

Поскольку современные исследования свидетельствуют о климатических изменениях во всех регионах нашей планеты, в том числе и на территории Украины (в частности отклонением температуры и других метеорологических параметров от значений климатической нормы), их изучение крайне важно. Ведь они могут привести к изменениям характера распределения осадков, протяженности вегетационного периода, уменьшения продолжительности залегания устойчивого снежного покрова, водных ресурсов местного стока и др. Большинство научных работ за последние годы описывают изменения в распределении температурных характеристик и режима осадков, ведь они являются одними из основных показателей состояния климатической системы. Поэтому целью данной статьи является выявления особенностей изменений температуры воздуха и осадков для всей территории Украины с 2021 по 2050 годы по результатам 16 симуляций ансамбля моделей CORDEX на основе сценария RCP4.5. Проект CORDEX является современной симуляцией будущего климата и имеет разрешение $\sim 12,5$ км в горизонтальной плоскости, что позволяет лучше смоделировать исследуемые характеристики. Он объединяет климатические прогнозы в региональном масштабе, которые созданы с использованием статистических и динамических методов. Полученные результаты представленные для 177 городов Украины, которые в настоящее время составляют основу современной мониторинговой сети.

Обнаружено, что количество дней с осадками ≥ 5 мм в переходные сезоны возрастает в среднем на 1-3 дня в месяц в зависимости от региона. Максимальные значения повторяемости количества дней с осадками ≥ 5 мм наблюдаются на западе и постепенно уменьшаются в южном направлении. По сравнению с 1961-1990 годами, наиболее существенные изменения происходят с количеством морозных дней с температурой воздуха $\leq 0^\circ\text{C}$, которая ощутимо уменьшается за исследуемый период с севера на юг. В апреле и октябре для южных областей Украины рассмотренный параметр равен 0, это означает, что в данные месяцы температура воздуха для этих регионов будет иметь положительные значения.

С результатов исследования прослеживается тенденция к потеплению в переходные сезоны и изменение характера влагообеспечения территории Украины в ближайшие тридцать лет.

Ключевые слова: изменение климата; температура воздуха; осадки; CORDEX

Подання до редакції : 10. 11. 2020
Надходження остаточної версії : 09. 12. 2020
Публікація статті : 17. 12. 2020

УДК : 633.15:551.525

**АГРОКЛІМАТИЧНА ОЦІНКА КЛІМАТУ ҐРУНТІВ ПІВНІЧНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я
НА ПРИКЛАДІ КУКУРУДЗИ****Н. В. Кирнасівська, І. Г. Шулякова***Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, nkirnasivska@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5179-6163*

Клімат ґрунту – це природний ресурс території і компонент природного середовища. Велике значення має ґрунтовий клімат для рослинництва -- проростання насіння сільськогосподарських культур, перезимівлі озимих рослин та багаторічних трав, ріст кореневої системи та надземної маси рослин в ході вегетації, продуктивність самих рослин.

Роль клімату ґрунту чітко проявляється також в критичні до вологи і тепла періоди, коли нестача чи надлишок вологи і низька або висока температура в верхніх шарах ґрунту можуть різко відзначитися на реакції рослин до умов природного середовища і тим самим на їх продуктивності. Вивчаючи клімат ґрунту, можна регулювати його у відповідності до потреб сільського господарства.

У зв'язку з вищесказаним метою роботи є визначення кількісних характеристик клімату ґрунту території Північного Причорномор'я стосовно кукурудзи. Об'єкт дослідження – територія Північного Причорномор'я. Предмет дослідження – клімат ґрунту. В роботі використані класичні методи агрокліматичних розрахунків і узагальнень. В статті надані результати агрокліматичної оцінки клімату ґрунту Північного Причорномор'я стосовно кукурудзи по теплових ресурсах ґрунтів та ресурсах вологи і вологозабезпеченості культури.

Наведені результати кількісної агрокліматичної оцінки термічного режиму ґрунтів різного механічного складу в Північному Причорномор'ї за наступними показниками: а) дати переходу температури ґрунту через 10 °С навесні і восени на поверхні ґрунту і на глибинах 10, 20 см; б) тривалість теплового періоду з температурою вище 10 °С на ґрунтах різного механічного складу; в) сума активних температур вище 10 °С на поверхні ґрунту і на її глибинах. Наведені результати агрокліматичної оцінки ресурсів вологи та вологозабезпеченості даної території за такими основними показникам: оптимальна водопотреба, фактична водопотреба, випаровуваність; коефіцієнт вологозабезпеченості; показник зволоження Г. Т. Селянинова і показник зволоження Д. І. Шашко за теплий період з температурою вище 10 °С. Виконана кількісна оцінка залежності між вологозапасами в ґрунті на різних глибинах (0–20 см, 0–50 см, 0–100 см) та запасами продуктивної вологи при найменшій вологоємності і вологозабезпеченості кукурудзи.

Ключові слова: клімат ґрунтів; агрокліматичні ресурси; термічний режим ґрунту; ресурси вологи; вологозабезпеченість; кукурудза

1. ВСТУП

Клімат ґрунту є важливою складовою частиною фізико-географічного середовища, який безпосередньо впливає на сільськогосподарське виробництво, зростання та врожай рослин, на проведення польових робіт. Під кліматом ґрунту розуміють багаторічний режим температури і вологості ґрунту, ґрунтового повітря та інших елементів, які залежать від комплексу природних умов і виробничої діяльності людини і регулюються останніми в сільськогосподарських або інших цілях. В деякі періоди вирішальну роль грає температура ґрунту, а в інші – його воло-

гість. В одних районах визначне значення має волога. В других – температура при спільній їх дії, а також аерація ґрунту. Отже клімат ґрунту можна розглядати як природний ресурс території і компонент природного середовища.

Метою роботи є визначення кількісних характеристик клімату ґрунту території Північного Причорномор'я стосовно кукурудзи.

2. СТАН ВИВЧЕННЯ ПИТАННЯ. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Постановка питання про клімат ґрунту належить вітчизняній науці. Вперше

в агрокліматології питання про клімат ґрунтів підняв П.І. Колосков (1946). Надалі поняття про клімат ґрунту уточнювалося в наукових роботах видатних вчених.

Окремі елементи клімату ґрунтів комплексно проаналізовані в публікаціях М. І. Будико (1971), Л. В. Попович (1971), Архипова Є. П. (1967); В. Н. Димо (1972), А. Р. Константинова (1981), І. Н. Соловйова (1989, 1985, 1992), О. М. Шульгина (1972), Н. Г. Горишиної (1968, 1980), Л. Е. Інта (1986) і охоплювали території Європейської частини СНГ, Естонії, Білорусії, Казахстану, а в останні роки і Україну.

В ХХ-му столітті досить детально вивчені ресурси вологи в ґрунті з оцінкою вологозабезпеченості ряду сільськогосподарських культур (зернові ярі, зернові озимі, кукурудза, цукрові буряки, картопля і ін.) на території СНД, в тому числі в Україні. Великий цикл досліджень по ресурсам вологи в ґрунті виконаний А. М. Алпатьєвим (1969), С. А. Веріго і Л. А. Разумовою (1973), Л. С. Кельчевською (1983), А. А. Роде (1984) та ін. Виявлено географічні закономірності розподілу середніх багаторічних запасів продуктивної вологи в ґрунті під різними культурами в сезонному розрізі. Фізичне обґрунтування для кількісної оцінки вологозабезпеченості культурних рослин дано в роботах М. І. Будико (1971) і Л. І. Зубенок (1976).

Методи та підходи до вивчення клімату ґрунтів в землеробстві охарактеризовано в наукових роботах М.Г. Кіта [1] стосовно західних областей України.

За роки досліджень розвивається методика картування показників теплового та водного режимів різних ґрунтів в середньому та великому масштабах. В останні роки з'явилася невелика кількість робіт з агрокліматичних досліджень території України. Ляшенко Г. В. [2] виконала комплексний підхід до агрокліматичної оцінки продуктивності сільськогосподарських культур. Автором побудовані карти теплових ресурсів повітря та ресурсів вологи у вигляді шарів, шляхом синтезу яких одержана комплексна агрокліматична карта з застосуванням ГІС-технологій.

Дмитренко В. П. та Круківська А. В. [3] виконали дослідження по агрокліматичній оцінці умов вологозабезпечення території України в період вегетації сільськогосподарських культур. Авторами розроблений новий метод агрогідрологічного районування України на основі об'єктивної класифікації умов атмосферного зволоження, агрогідрологічних властивостей різних ґрунтів, режиму ґрунтових вод і рельєфу місцевості в період вегетації сільськогосподарських культур.

Районування виконано в мілкому масштабі.

Міщенко З. А. та Кирнасівською Н. В. [4] виконана кількісна оцінка ресурсів вологи в ґрунті і вологозабезпеченість соняшнику і кукурудзи, а також виявлені географічні особливості їх розподілу на території України з урахуванням мікрокліматичної мінливості на ґрунтах різного механічного складу. Картографування виконано в середньому масштабі з виділенням 7 макрорайонів.

В останні роки розвиваючи напрямок наукових досліджень клімату ґрунту Кирнасівською Н.В. виконуються детальні дослідження температурного режиму ґрунту різного механічного складу з подальшим картографуванням в межах адміністративних областей на території України [5, 6]. В даній же роботі вперше виконана детальна комплексна оцінка клімату ґрунту, яка охоплює термічний режим ґрунту та режим зволоження ґрунту в межах Північного Причорномор'я та надається оцінка вологозабезпеченості культури.

В сучасних умовах з'явилися роботи науковців, присвячені питанню впливу змін клімату на температурний режим ґрунту та режим зволоження в межах адміністративних областей [7,8].

3. ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

В роботі використані класичні методи агрокліматичних розрахунків і узагальнень. Для кількісної оцінки термічного режиму та теплових ресурсів ґрунту в шарі 0-20 см в межах Північного Причорномор'я з агрокліматичних довідників залучені середні багаторічні матеріали (1986 – 2005 рр.) спостережень на 30 метеорологічних станціях, які рівномірно освітлюють досліджувану територію. За допомогою робочих графіків річного ходу температури ґрунту на різних рівнях (0, 10, 20 см) визначені такі показники: а) дати переходу температури ґрунту через 10 °С навесні і восени (D_{0z} , D_{0z}) на поверхні ґрунту і на глибинах 10, 20 см; б) тривалість теплового періоду з T_{n2} , T_z і T'_z вище 10 °С на поверхні ґрунту і на глибинах 10, 20 см; (N_{n2} , N_z , N'_z); в) сума активних температур вище 10 °С на поверхні ґрунту і на її глибинах (ΣT_{n2} , ΣT_z , $\Sigma T'_z$).

Достовірність отриманих даних визначена за раніше встановленими графіками взаємозв'язку між: сумою температур поверхні ґрунту (ΣT_{n2}) і на рівнях 10, 20 см (ΣT_z , $\Sigma T'_z$) з сумою активних

температур повітря вище 10 °С (ΣT_c); тривалістю теплового періоду з T_c вище 10 °С поверхні ґрунту (N_{nz}) і на рівнях 10, 20 см (N_z, N'_z) з тривалістю теплового періоду з середньою добовою температурою повітря вище 10 °С (N_{mn}) за 150 станціями стосовно території України [18]. Рівняння зв'язку мають наступний вигляд:

$$\Sigma T_{nz} = 1,32 \cdot \Sigma T_c - 284,7, \quad r=0,97, \quad (1)$$

$$\Sigma T_z = 1,224 \cdot \Sigma T_c - 214,4, \quad r=0,97, \quad (2)$$

$$\Sigma T'_z = 1,18 \cdot \Sigma T_c - 173,1, \quad r=0,95, \quad (3)$$

$$N_{nz} = 1,08 \cdot N_{mn} - 4,73, \quad r=0,92, \quad (4)$$

$$N_z = 1,07 \cdot N_{mn} - 3,54, \quad r=0,93, \quad (5)$$

$$N'_z = 1,125 \cdot N_{mn} - 12,77. \quad r=0,94. \quad (6)$$

Коефіцієнти кореляції (r) коливаються в межах 0,92-0,97, що характеризує досить високу тісноту зв'язків між цими термічними показниками.

Для кількісної оцінки показників ресурсів води та вологозабезпеченості території Північного Причорномор'я та ресурсів води вегетаційного періоду і вологозабезпеченості кукурудзи на даній території було складено банк даних, який охоплює основні показники режиму зволоження за сезони року та в цілому за теплий період з T_c вище 10 °С. Вихідні середньобогаторічні дані по датам початку теплового періоду на весні і кінця його восени (D_v, D_o), кількості опадів (Σr , мм), дефіциту вологості повітря (Σd , мм), запасах продуктивної води в шарах ґрунту 0-20 см, 0-50 та 0-100 см, середньодекадній температурі повітря (T_{cp} , °С) з квітня по листопад одержані з агрокліматичних довідників по Одеській, Миколаївській, Херсонській областях та довідників по клімату. Розрахунки виконані для 23 станцій, які рівномірно освітлюють територію Північного Причорномор'я за такими основними показниками: $E_o, E, (E_o - E); E/E_o; ГТК$ і Md за теплий період с T_c вище 10 °С.

Розрахунки проводилися з використанням відомих методів за формулами:

$$E_o = K_o \cdot \Sigma d, \quad (7)$$

де E_o – потреба рослин у воді чисельно рівна сумарному випаровуванню фітоценозу при оптимальному режимі зволоження, (мм); K_o – біологічний коефіцієнт даної культури (безрозмірна величина), який в середньому за вегетаційний період може бути прийнятий рівним 0,65; Σd – сума дефіцитів вологості повітря (мм або мб);

$$E = \Sigma r - F + (W_n - W_k), \quad (8)$$

де Σr – кількість опадів за розрахунковий період (мм); F – поверхневий стік (мм); W_n, W_k – запаси продуктивної води на початок і кінець вегетації (мм).

При цьому вологозабезпеченість визначається за формулою

$$V_k = \frac{E}{E_o} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Показник зволоження Селянинова Г. Т. (гідротермічний коефіцієнт) розраховувати за формулою

$$ГТК = \frac{\Sigma r}{\Sigma T_c : 10}, \quad (10)$$

де Σr – кількість опадів в теплий період; ΣT_c – сума середньодобових температур повітря вище 10 °С за період вегетації культур (зазвичай за травень, червень, липень, серпень), зменшена в 10 разів, умовно характеризує випаровуваність.

Показник зволоження, запропонований Д. І. Шашко (1985), розраховується за формулою

$$Md = P / \Sigma d, \quad (11)$$

де P – кількість опадів за рік; Σd – сума середніх добових дефіцитів вологості повітря за рік, що є показником випаровуваності.

Через недостатню кількість даних по запасах продуктивної води на початок і кінець вегетаційного періоду розрахунки деяких показників проводилися за формулами, одержаними для території України та наведених у роботі [18].

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз середньобогаторічних даних температури повітря і ґрунту на різних рівнях (0, 10, 20 см) показав, що по всій території Північного Причорномор'я зберігається загальна закономірність: найбільш високі температури в теплу пору року спостерігаються на поверхні ґрунту, найбільш низькі - у повітрі на рівні будки (рис. 1). Крутизна всіх кривих річного ходу температури збільшується в напрямку з півночі на південь території з збільшенням надходження сонячної радіації.

Встановлено, що на території Північного Причорномор'я діапазон термічних відмінностей між температурою на поверхні ґрунту та в повіт-

рі становить влітку 5-6 °С, а на весні та восени 1-2 °С. Аналогічна закономірність зберігається і при порівнянні тривалості теплого періоду та сум температур ґрунту на різних рівнях (0, 10, 20 см) з традиційними показниками теплових ресурсів повітря. Виявлено, що із збільшенням глибини ґрунту тривалість теплого періоду та суми температур ґрунту зменшуються. Встановлено також, що показники теплових ресурсів на всіх рівнях ґрунту значно вище, ніж у повітрі на рівні будки. Діапазон зональних відмінностей по території Північного Причорномор'я у тривалості періоду (N_{m} та N'_n) і сумах температур ґрунту (ΣT_{ne} та $\Sigma T'_e$) значний і становить відповідно 15 та 8 днів і 800 та 700 °С. Встановлено, що суми температур поверхні ґрунту (ΣT_{ne}) і на глибині 20 см (ΣT_e) вище середньодобових температур повітря за теплий період ($\Sigma T_c > 10$ °С) більш ніж на 600 °С і більш ніж на 350 °С відповідно (табл. 1).

Встановлено, що вплив клімату ґрунту простежується і при порівнянні дат переходу температури повітря і ґрунту через 10 °С навесні і восени. Навесні з підвищенням температури повітря до 10 °С поверхня ґрунту починає прогріватися раніше, ніж повітря. Перехід температури через 10 °С на поверхні ґрунту настає на 7-12 днів раніше, ніж у повітрі. На глибині 20 см прогрівання ґрунту по всій території Північного Причорномор'я відбувається раніше, ніж у повітрі на 1-10 днів. Восени повітря починає охолоджуватися по всій території на 1-4 дні раніше при середньодобових температурах 10 °С. На глибині 20 см охолодження ґрунту настає пізніше на 3-9 днів по всій території при середньодобових температурах 10 °С.

На другому етапі роботи виконана агрокліматична оцінка показників ресурсів вологи та вологозабезпеченості території Північного Причорномор'я. Загальна закономірність просторового розподілення показників вологозабезпеченості за теплий період складається в поступовому збільшенні їх від прибережних районів, та південних до більш континентальних даної території. Так, найбільша сума опадів в теплий період (369 мм) спостерігається на ст. Первомайськ Миколаївської області, а найменша (196 мм) на ст. Хорли Херсонської області. Дефіцит насичення, як наслідок, фактичне та оптимальне випаровування також зростають по мірі віддалення від прибережних районів. Розподіл середнього за теплий період відносного випаровування по території Північного Причорномор'я коливається в межах

0,43 до 0,61, ГТК = 0.7-1.0 та Md = 0,23-0,32, що вказує за даними показниками на формування умов недостатнього зволоження в Одеській та Миколаївській областях та засушливого клімату в Херсонській області -- (ГТК менше 0,7 та Md = 0,21-0,18) (рис. 2)

Виконано аналіз динаміки запасів продуктивної вологи під кукурудзою з квітня по вересень для 17 станцій території Північного Причорномор'я. Загальною закономірністю є зменшення запасів продуктивної вологи від весни до кінця літа. На початок вегетації, поки не розпочалися витрати вологи на транспірацію, запаси вологи в третій декаді квітня в орному шарі складають 20-30 мм, на глибині 100 см -- не перевищують 148 мм. В кінці літа запаси продуктивної вологи в шарі 0-100 см зменшуються до 40-80 мм в Одеській області; до 30-60 мм в Миколаївській та 25-50 мм в Херсонській областях. Діапазон відмінностей складає 80-90 мм по території Північного Причорномор'я.

Виконана кількісна оцінка запасів продуктивної вологи в шарах ґрунту 0-20, 0-50 на весну (табл. 2) та 0-100 см і вологозабезпеченість кукурудзи за вегетаційний період (табл. 3) в Північному Причорномор'ї. Встановлено, що запаси продуктивної вологи в шарі ґрунту 0-20 см на весну не перевищують по території Північного Причорномор'я 24-32 мм і складають 66% - 96% від неповної польової вологоємності. Запаси продуктивної вологи в шарі ґрунту 0-50 см на дату посіву кукурудзи в 2 рази збільшуються і не перевищують 62-77 мм, що складає 64-96% найменшої польової вологоємності. Отже, на початок вегетаційного періоду на досліджуваній території складаються задовільні та добрі умови вологозабезпеченості посівів кукурудзи. Встановлено, що за вегетаційний період в Північному Причорномор'ї середні запаси продуктивної вологи становлять 66-117 мм, що складає 45 - 82% найменшої польової вологоємності, що відповідає поганим та задовільним умовам вологозабезпеченості. Фактичне випаровування за період активної вегетації коливається в межах 132-309 мм, а випаровуваність від 268 до 569 мм. Як наслідок, умовний показник вологозабезпеченості (E/E_0) періоду вегетації кукурудзи по території складає 0,32-0,60, що відповідає поганим та задовільним умовам вологозабезпеченості. Через посушливі умов на фоні високих температур у Херсонській області кукурудза закінчує вегетацію у фазі 15-й листок, в окремі роки в фазі цвітіння качана та в фазі цвітіння волоті.

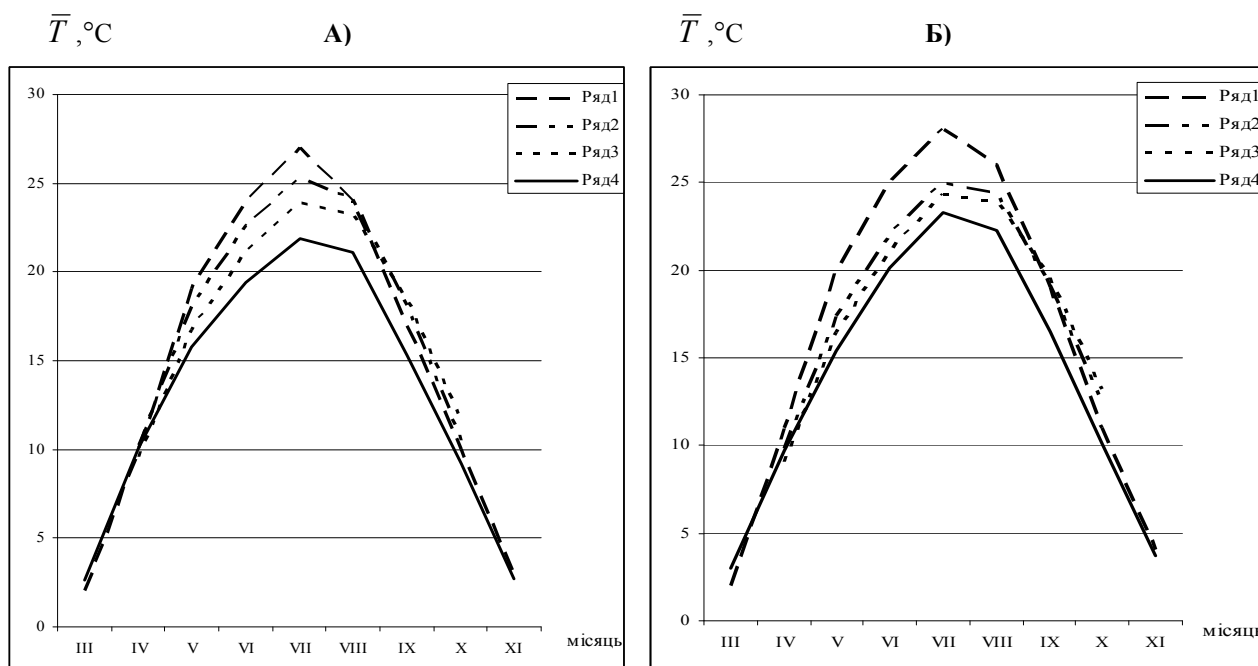


Рис. 1 – Річний хід температури на різних рівнях: 1- поверхня ґрунту; 2, 3- на глибинах 10, 20 см; 4 - в повітрі на рівні будки. Станції: А) Первомайськ; Б) Асканія-Нова. Ґрунт важкосуглинковий.

Fig. 1 – Yearly change of temperature on the different layers: 1 – the soil top; 2, 3 – in the depth 10, 20 cm; 4 – in the air on the meteorbox layer. Weather stations: А) Pervomaisk; Б) Askania-Nova. Soil: heavy clay loam

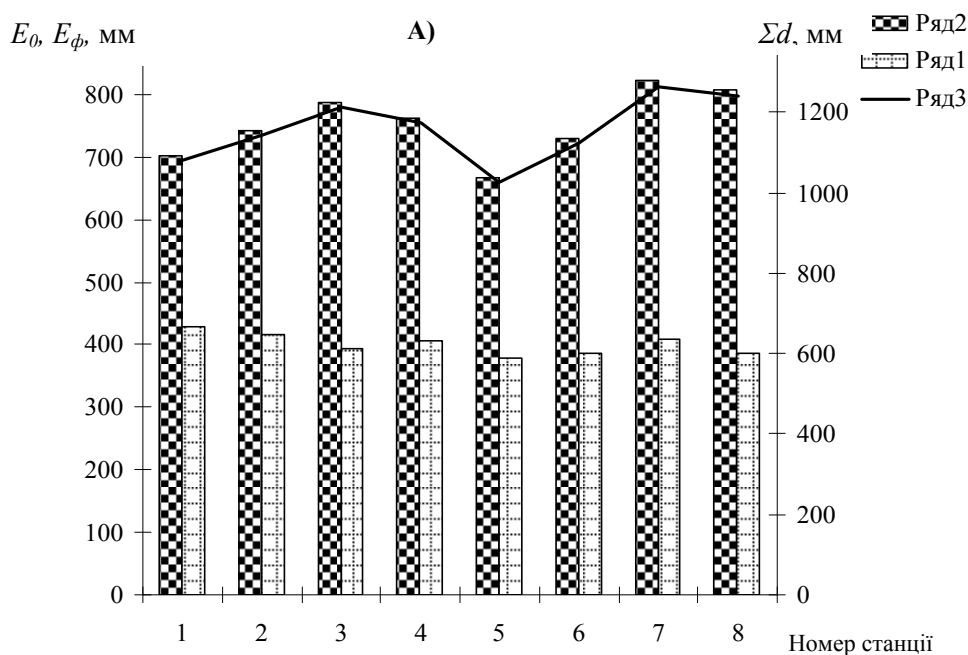
Таблиця 1 – Агрокліматичні показники теплових ресурсів ґрунту в порівнянні з повітрям на рівні будки в різних районах північного Причорномор’я

Table 1 – Agroclimatic indicators of thermal resources of the soil in comparison with the air on meteorbox layer in different areas of North Black Sea Region

№ п/п	Станція	Шар ґрунту	Показники ґрунту				Показники повітря			
			<i>Двп</i>	<i>Доп</i>	<i>Nmn</i>	$ST_n > 10^\circ C$	<i>Дв</i>	<i>До</i>	<i>Nmn</i>	$ST_c > 10^\circ C$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Одеська область										
1	Любашівка	0	15.04	15.10	183	3600	22.04	11.10	171	3085
		10	19.04	18.10	182	3407				
		20	21.04	20.10	182	3311				
2	Одеса	0	11.04	19.10	191	3942	23.04	23.10	182	3260
		10	15.04	23.10	191	3799				
		20	19.04	26.10	190	3687				
3	Ізмаїл	0	7.04	24.10	200	4208	15.04	25.10	192	3515
		10	5.04	25.10	203	4197				
		20	5.04	28.10	206	4024				
Миколаївська область										
4	Первомайськ	0	15.04	15.10	183	3700	20.04	12.10	174	3070
		10	16.04	17.10	184	3635				
		20	16.04	20.10	187	3537				

Таблиця 1 – Продовження
Table 1 – Continued

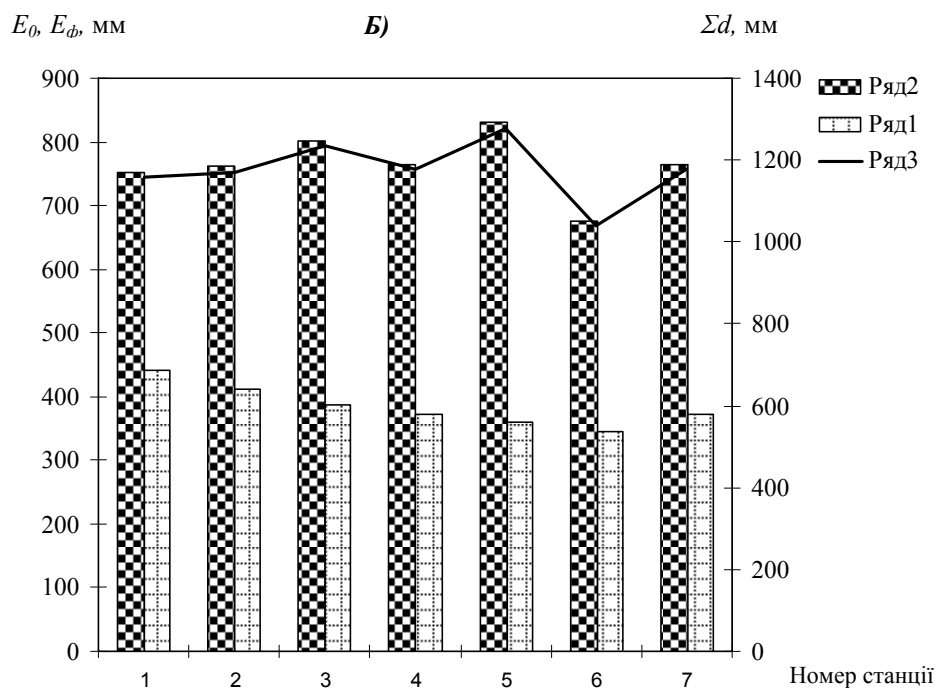
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	Миколаїв	0	05.04	22.10	200	4449	19.04	17.10	180	3325
		10	11.04	25.10	197	4225				
		20	13.04	29.10	199	4149				
6	Очаків	0	08.04	19.10	194	4148	21.04	21.10	182	3360
		10	25.04	21.10	179	3763				
		20	26.04	22.10	179	3694				
Херсонська область										
7	В. Олександрівка	0	11.04	15.10	187	3943	18.04	14.10	178	3275
		10	15.04	18.10	186	3651				
		20	18.04	23.10	188	3602				
8	Херсон	0	07.04	23.10	199	4259	18.04	17.10	181	3340
		10	13.04	24.10	194	3963				
		20	15.04	25.10	193	3893				
9	Генічеськ	0	07.04	22.10	198	4307	20.04	23.10	185	3445
		10	13.04	26.10	196	4059				
		20	15.04	30.10	198	4019				



Примітка: 1- ст. Любашівка; 2 – ст. Затишся; 3- ст. Сербка; 4 – ст. Роздільна; 5 – ст. Одеса; 6 – ст. Сарата; 7 – ст. Болград; 8-ст. Ізмаїл

Рис. 2 – Динаміка фактичної випаровуваності (E_{ϕ}) (Ряд 1), оптимального випаровування (E_0) (Ряд 2) та суми дефіциту насичення водяної пари (Σd) (Ряд 3) в Одеській (А) та Миколаївській (Б) областях

Fig. 2 – Dynamics of actual evaporation (range 1); optimal evaporation (range 2) and amount of deficit of aqueous vapor intensity (range 3) in Odesa (A) and Mykolaiv (B) areas



Примітка: 1- ст. Первомайськ; 2 – ст. Вознесенськ; 3- ст. Баштанка; 4 – ст. Снігурівка; 5 – ст. Миколаїв; 6 – ст. Очаків; 7 – ст. Березанка

Рис. 2 – Продовження
Fig. 2 – Continued

Таблиця 2 - Кількісна оцінка запасів продуктивної вологи в шарах ґрунту 0-20, 0-50 см на весну під посівами кукурудзи в Північному Причорномор'ї

Table 2 – Quantitative estimation of productive moisture in the soil layers 0-20, 0-50 cm in spring with maize plantings in North Black Sea Region

Станція	Механічний склад	Весна					
		Шар ґрунту 0-20 см			Шар ґрунту 0-50 см		
		W _n	W _{нпв}	W _n / W _{нпв}	W _n	W _{нпв}	W _n / W _{нпв}
Одеська область							
Любашівка	важкосуглинковий	31	42	0,74	71	90	0,79
Одеса	середньосуглинковий	29	39	0,74	69	90	0,77
Ізмаїл	середньосуглинковий	28	38	0,74	66	94	0,70
Миколаївська область							
Вознесенськ	важкосуглинковий	30	43	0,70	69	92	0,75
Баштанка	легкоглинистий	32	43	0,74	77	80	0,96
Березанка	важкосуглинковий	33	41	0,80	68	83	0,82
Херсонська область							
В. Олександрівка	важкосуглинковий	32	39	0,82	73	79	0,92
Херсон	середньосуглинковий	29	41	0,71	69	99	0,70
Попелак	глинистий	28	44	0,64	64	85	0,75
Асканія Нова	важкосуглинковий	28	37	0,76	60	84	0,71

Таблиця 3 – Кількісна оцінка запасів продуктивної вологи в шарах ґрунту 0-100 см та вологозабезпеченість кукурудзи за вегетаційний період в північному Причорномор'ї

Table 3 - Quantitative estimation of productive moisture resources in the soil layers 0-100 cm and maize moisture provision for vegetative period in North Black Sea region

Станція	Механічний склад	Вегетаційний період						
		Шар ґрунту 0-100 см			Показники вологозабезпечення			
		W_n	\bar{W}_{en}	$\bar{W}_{en}/W_{нпв}$	ΣR	E_ϕ	E_0	V
Одеська область								
Любашівка	важкосуглинковий	141	112	0,73	228	309	523	0,59
Одеса	середньосуглинковий	129	101	0,62	118	185	299	0,62
Ізмаїл	середньосуглинковий	108	82	0,44	168	238	533	0,45
Миколаївська область								
Вознесенськ	важкосуглинковий	113	83	0,47	182	237	439	0,54
Баштанка	легкоглинистий	108	86	0,68	158	220	405	0,54
Березанка	важкосуглинковий	113	98	0,65	160	197	424	0,46
Херсонська область								
В. Олександрівка	важкосуглинковий	117	81	0,52	122	162	500	0,32
Херсон	середньосуглинковий	116	66	0,50	139	217	343	0,38
Асканія Нова	важкосуглинковий	82	86	0,45	135	160	468	0,46

5. ВИСНОВКИ

Вперше одержані кількісні результати з оцінки клімату ґрунтів території північного Причорномор'я з комплексною оцінкою теплових ресурсів ґрунтів та вологозапасів території. Також виконана оцінка вологозабезпеченості вегетаційного періоду кукурудзи в даному районі вирощування. Встановлено, що діапазон термічних відмінностей між температурою на поверхні ґрунту та в повітрі складає влітку 5-6 °С, а на весні та восени 1-2 °С. Виявлено, що із збільшенням глибини ґрунту тривалість теплового періоду та суми температур ґрунту зменшуються. Виявлено, що із збільшенням глибини ґрунту тривалість теплового періоду та суми температур ґрунту зменшуються. Діапазон зональних відмінностей по території Північного Причорномор'я у тривалості періоду та сум активних температур значний і становить відповідно 15 та 8 днів і 800 та 700 °С.

Виконана агрокліматична оцінка показників ресурсів вологи та вологозабезпеченості території Північного Причорномор'я за основними показниками волого забезпечення за теплий період с T_c вище 10 °С. Загальна закономірність просторового розподілення показників волого-

забезпеченості за теплий період складається в поступовому збільшенні їх від прибережних районів, та південних до більш континентальних даної території. Одержані результати за показниками вологозабезпеченості формують умови недостатнього зволоження в Одеській та Миколаївській областях та засушливого клімату в Херсонській області.

Виконана кількісна оцінка запасів продуктивної вологи в шарах ґрунту 0-20, 0-50 на весну та 0-100 см і вологозабезпеченість кукурудзи за вегетаційний період в Північному Причорномор'ї. Встановлено, що на початок вегетаційного періоду по території складаються задовільні та добрі умови вологозабезпеченості посівів кукурудзи. Встановлено, що в Одеській області в середньому за вегетаційний період запаси продуктивної вологи в межах області становлять 87-117 мм, що складає 55 - 82% найменшої польової вологості, вологозабезпеченості періоду вегетації кукурудзи по території області складає 0,38-0,47 в південній її частині та 0,45-0,62 з просуванням на північ, що відповідає поганим та задовільним умовам вологозабезпеченості. На території Миколаївської області за даними показниками складаються умови незадовільної та поганої вологозабезпеченості періоду

вегетатії культури. На території Херсонської області середні запаси продуктивної вологи за вегетаційний період становлять 66-97 мм, що відповідає 45-61% найменшої польової вологості, а умовний показник зволоження найвищий на ст. В. Олександрівка (0,60), на інших станціях знижується до 0,32-0,60, що відповідає умовам незадовільної та поганій вологозабезпеченості.

Отже, одержані результати можуть застосовуватися у сільськогосподарському виробництві для регулювання посіву сільськогосподарських культур, зокрема кукурудзи, заходів регулювання клімату ґрунтів та прогнозування врожаю. Також отримані результати можуть бути використані для регіонального агрокліматичного районування клімату ґрунтів досліджуваної території з урахуванням мікроклімату та спеціального агрокліматичного районування стосовно культури кукурудза.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кіт М. Г. Клімат ґрунтів західних областей України: автореф. дис...канд. геогр. наук / Одеський державний ун-т ім.М.І. Мечникова. 1995. 25 с.
2. Ляшенко Г. В. Агрокліматическая оценка продуктивности сельскохозяйственных культур в Украине. Одесса, 2011. С. 110-113.
3. Круківська А. В. Агрокліматична оцінка умов вологозабезпечення території України у період вегетатії сільськогосподарських культур: автореф. дис...канд. геогр. наук / Київський національний ун-т ім. Т. Шевченка, Київ, 2008. 20 с.
4. Мищенко З. А., Кирнасовская Н. В. Агрокліматические ресурсы Украины и урожай: монографія. Одесса, 2011. 291 с.
5. Кирнасовская Н.В. Оценка урожая гречихи разного вида и уровня с учетом тепловых ресурсов почв в Сумской области. *Культура народов Причерноморья*. 2013. №253. С. 101-105.
6. Кирнасовская Н. В. Комплексная оценка и районирование показателей тепловых ресурсов почв в Одесской области. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2014. № 15. С. 102-111.
7. Решоткин О. В., Худяков О. И., Бедрина Т. Н. Температурный режим подзолистых почв Предуралья в связи с потеплением климата. *Известия Самарского*

научного центра Российской академии наук. 2010. Том 12. №1(4). С. 1059-1063.

8. Крымская О. В., Лебедева М. Г. Запасы продуктивной влаги под агроценозами Белгородской области. *Научные ведомости. Серия Естественные науки*. 2011. № 15(110). Вып. 16. С. 180-185.

REFERENCES

1. Kit, M.G. (1995). *Klimat hruntiv zakhidnykh oblastei Ukrainy [Soil climate of the western regions of Ukraine]*. Abstract of Ph.D. Thesis. The M.I.Mechnikov Odessa State University. (in Ukr).
2. Lyashenko, G.V. (2011). *Agroklimaticheskaya otsenka produktivnosti selskokhozyaystvennykh kultur v Ukraine [Agroclimatic assessment of crop productivity in Ukraine]*. Odessa. [in Russ].
3. Krukivska, A.V. (2008). *Ahroklimatychna otsinka umov volohozabespechennia terytorii Ukrainy u period vegetatsii silskohospodarskykh kultur [Agroclimatic estimation of conditions of moisture provision of the territory of Ukraine during the period of vegetation of crops]*. Abstract of Ph.D. Thesis. The T. Shevchenko National University of Kyiv. (in Ukr).
4. Mishchenko, Z.A. & Kirnasovskaya, N.V. (2011). *Agroklimaticheskie resursy Ukrainy i urozhay [Agroclimatic resources of Ukraine and harvest]*. Odessa. (in Russ).
5. Kirnasovskaya, N.V. [Assessment of yields of buckwheat of different types and levels, taking into account the thermal resources of soils in the Sumy region]. *Kultura narodon Prichernomor'ya [Culture of the peoples of the Black Sea region]*, 2013, 253, pp. 101-105. (in Russ).
6. Kirnasovskaya, N.V. (2014). [Comprehensive assessment and zoning of indicators of thermal soil resources in the Odessa region]. *Ukrains'kij gidrometeoro-logičnij žurnal. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 15, pp. 102-111. (in Russ).
7. Reshotkin, O.V., Khudyakov, O.I. & Bedrina, T.N. (2010). [Temperature regime of podzolic soils in the Cis-Urals in connection with climate warming]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*, vol. 12, 1(4), pp. 1059-1063. (in Russ).
8. Krymskaya, O.V. & Lebedeva, M.G. (2011). [Productive moisture reserves under agrocenoses of the Belgorod region]. *Nauchnye vedomosti. Seriya Estestvennye nauki [Scientific Bullitin. Series Natural Sciences]*, 15(110), issue 16, pp. 180-185. (in Russ).

AGROCLIMATIC ASSESSMENT OF SOIL CLIMATE OF THE NORTHERN BLACK SEA COAST REGION (USING THE EXAMPLE OF CORN)

N. V. Kirnasovskaya, I. G. Shulyakova

Odessa State Environmental University
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, nkirmasivska@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5179-6163

Soil climate is a natural resource of a certain territory and a component of the natural environment. The soil climate is very important for crop production: germination of seeds of agricultural crops, dormancy of overwintering plants and perennial grasses, growth of the root

system and plants' aboveground mass during the growing season, productivity of plants.

The role of the soil climate is also clearly manifested during moisture- and heat-dependant periods when moisture lack or excess and low or high temperature in the upper soil layers may have a significant influence on reaction of plants to the environmental conditions and consequently on their productivity. When studying the soil climate, it is possible to adjust it following the agricultural needs.

In connection therewith, the aim of the research is to determine the quantitative characteristics of the soil climate of the Northern Black Sea region using the example of corn. The object of the research: the Northern Black Sea region. The subject of the research: soil climate. The study applies classical methods of agroclimatic calculations and generalizations. The article presents the results of agroclimatic assessment of the Northern Black Sea region's soil climate using the example of corn in relation to such criteria as soil thermal resources and moisture/moisture availability resources of an individual crop.

It specifies the results of quantitative agroclimatic assessment of the thermal regime of soils with different mechanical composition across the Northern Black Sea region as per the following indicators: a) date of soil temperature transitions through 10 °C in spring and autumn on the top of the soil and at depths of 10, 20 cm; b) duration of a warm period with the temperature above 10 °C for soils having different mechanical composition; c) combined total of active temperatures above 10 °C on the top of the soil and at certain depths. The research also presents the results of agroclimatic assessment of moisture/moisture availability resources within the studied territory based on the following main indicators: optimum water demand, actual water demand, evaporation rate; moisture availability coefficient; moisture index by G. T. Selianynov and moisture index by D. I. Shashko during a warm period with temperature above 10 °C. The paper also includes the quantitative assessment of the relationship between soil moisture reserves at different depths (0–20 cm, 0–50 cm, 0–100 cm) and productive moisture reserves at the lowest moisture content and moisture availability values for corn crops.

Keywords: soil climate; agroclimatic resources; soil thermal regime; moisture resources; moisture availability; corn.

АГРОКЛИМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЧВ СЕВЕРНОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ НА ПРИМЕРЕ КУКУРУЗЫ

Н. В. Кириасовская, И.Г. Шулякова

*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, nkimasivska@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5179-6163*

Климат почвы - это природный ресурс территории и компонент природной среды. Изучая почвенный климат можно регулировать его в соответствии с потребностями сельского хозяйства. Целью работы является изучение климата почв территории Северного Причерноморья на примере кукурузы. Объект исследования - территория Северного Причерноморья. Предмет исследования - климат почв. В работе использованы классические методы агроклиматических расчетов и обобщений. В работе представлены результаты агроклиматической оценки климата почв Северного Причерноморья на примере кукурузы. Рассмотрены методы по оценке тепловых ресурсов почв и ресурсов влаги и влагообеспеченности сельскохозяйственных культур. Приведены результаты количественной агроклиматической оценки термического режима почв разного механического состава в Северном Причерноморье. Приведены результаты агроклиматических оценки ресурсов влаги и влагообеспеченности данной территории. Выполнена количественная оценка зависимости между влагозапасами в почве и неполной полевой влагоемкостью и влагообеспеченность кукурузы.

Ключевые слова: климат почв; агроклиматические ресурсы; термический режим почвы; ресурсы влаги; влагообеспеченность; кукуруза.

Подання до редакції : 17. 11. 2020

Надходження остаточної версії : 11. 12. 2020

Публікація статті : 17. 12. 2020

УДК 551.509

СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩ ПОСІВІВ ОСНОВНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР УКРАЇНИ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

О. О. Кривошеїн¹, О. А. Кривобок¹, Адаменко Т. І.²

¹ Український гідрометеорологічний інститут,
03028, м. Київ, проспект Науки, 37, krivoshein@uhmi.org.ua

² Український Гідрометцентр
01601, м. Київ, вул. Золотоворітська, 6-В, adamenko@meteo.gov.ua

У даній статті розглядається одне з актуальних питань обслуговування сільськогосподарського виробництва -- створення системи автоматичного визначення площ посівів основних сільськогосподарських культур в Україні. Метою даної роботи є описання подібної системи, яка використовує в якості вхідної інформації супутникові дані високої роздільної здатності, а також оперативну агрометеорологічну інформацію (тип культури, дата сівби, вологість ґрунту, фаза розвитку, географічні координати та ін.) з мережі Гідрометцентру України. В основу побудови системи покладено поетапне вирішення наступних завдань: визначення геоінформаційних даних для окремих сільськогосподарських посівів; розроблення методів класифікації багатоспектральних супутникових зображень; розроблення програмних засобів для автоматизації процесу класифікації цих зображень із подальшим визначенням площ посівів. У цій роботі для здійснення класифікації сільськогосподарських угідь були застосовані наступні алгоритми (або класифікатори): SVM (метод опорних векторів), RF (метод «випадкового лісу») та NN (нейронні мережі). Вибір найбільш точного з них становив основу загального методу класифікації. В якості вхідних даних (ознак) були використані значення спектральних характеристик червоного та інфрачервоного каналів повного набору безхмарних супутникових знімків в період вегетації. Як результат були проведені тестові розрахунки по визначенню площ посівів сільськогосподарських культур у межах Київської області за 2018 рік. Оцінка точності отриманих результатів, яка проводилась шляхом зіставлення результатів визначення площ посівів за супутниковими даними зі статистичними даними, показала, що найменша точність характерна для посівів озимої пшениці та кукурудзи, точність класифікації сої та ярого ячменю невисока для більшості тестових районів, найбільша точність характерна для посівів соняшнику та ріпаку. Для поліпшення точності класифікації необхідно створювати більшу кількість класифікаційних ознак (у часовому аспекті), шляхом обробки більшої кількості супутникових знімків в період вегетації, а також збільшувати кількість і площу тестової вибірки шляхом систематичного відбору наземних даних по областях України через працівників агрометеорологічних станцій. Розроблено схему системи визначення площ посівів основних сільськогосподарських культур в Україні за супутниковими даними, яку пропонується використовувати в Гідрометцентрі України

Ключові слова: система визначення площ посівів, геоінформаційні дані, класифікація, основні сільськогосподарські культури.

1. ВСТУП

Для удосконалення агрометеорологічного обслуговування сільськогосподарського (с/г) виробництва в Україні одним з важливих аспектів є створення системи визначення площ посівів основних с/г культур.

Розвиток супутникових технологій на сьогоднішній день робить їх одним з основних інструментів вирішення глобальних питань в будь-якій сфері людської діяльності, в тому числі і сільському господарстві. Багаторічний досвід наукового аналізу супутникової інформації свід-

чить про принципову можливість використання супутникових даних для моніторингу посівів с/г культур: визначення посівних площ, параметрів рослинного покриву, стану польових культур та інше [1,2]. Саме тому в світовій практиці основним інструментом в системі визначення посівних площ с/г культур є супутникові дані. Так, за допомогою супутника Landsat 8 (виведеного на орбіту в 2013 році як результат об'єднаної місії NASA і USGS) можна отримувати знімки з просторовою роздільною здатністю 30 метрів, що дозволяє з досить високою точністю визначати площу посівів окремих с/г культур.

Одним з важливих методичних питань дистанційного зондування є точність ідентифікації обстежуваних посівів на супутниковому зображенні і створення відповідної класифікації для подальшого напівавтоматичного визначення площ посівів окремих сільськогосподарських культур. Вирішення цього питання є ключовим у розробленні якісної системи визначення площ посівів.

В даній роботі розкривається можливість реалізації загальної системи визначення площ посівів через поетапне вирішення ключових задач, а саме: розроблення методики отримання геоінформаційних даних для окремих сільськогосподарських посівів; розроблення методів класифікації багатоспектральних супутникових зображень та програмних засобів для автоматизації процесу класифікації цих зображень із подальшим визначенням площ посівів.

Взагалі завдання, яке вирішуються на кожному етапі даної роботи, досить складні, але в останній час в науково-технологічному аспекті вирішення цієї проблеми склалися такі передумови, що значно спрощують отримання кінцевого результату. По-перше, в світі здійснилися революційні зміни в отриманні оперативної супутникової інформації високого просторового та спектрального розрізнення. Дані з супутників Landsat-7/8, Sentinel - 1, 2 з просторовим розрізненням 20-30 м доступні практично через декілька годин після прольоту над досліджуваним районом (<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>, <https://www.sentinel-hub.com/>). Окрім цього, сучасні технології виробництва та запуску так званих кубсатів – нано та міні супутників, дозволяє значно збільшити їх кількість на орбіті. Лише компанія Planet Labs запустила у 2017 році 146 міні супутників. Їх запуск буде зростати у наступні роки на 30-50% щорічно. Друга компанія Satellogic планує здійснити запуск біля 300 супутників для отримання гіперспектральних даних з розрізненням від 1 до 30 метрів. Все це демонструє можливість отримання супутникової інформації в будь який час, над будь яким районом світу. По-друге, в останній час стрімко розвиваються методи класифікації супутникових зображень, які ґрунтуються на машинному навчанні – нейронні мережі, класифікація на основі дерев прийняття рішень, точність розпізнавання в який досягає 90% і більше. Паралельно з розвитком методів удосконалюються програмні засоби обробки супутникових даних, особливо це стосується таких мов програмування як R, Python, Google Engine, в яких реалізовано не тільки можливість попередньої

обробки даних (геометрична та радіометрична корекція), але і проведення класифікації зображень з залученням методів машинного навчання. І, по-третє, особливості, що стосуються території України полягають у тому, що мережа агрометеорологічних постів та станцій Українського гідрометеорологічного центру (УкрГМЦ) складається з більш ніж 100 одиниць, що дозволяє регулярно отримувати інформацію про стан та розташування посівів з будь якого регіону України та мінімізувати витрати на проведення подібних робіт.

Таким чином, розробка системи визначення площ посівів с/г культур має важливе практичне значення, оскільки спільно з результатами роботи адаптованої системи прогнозування врожайності [3] дозволить з достатньою точністю визначати майбутній валовий збір врожаю основних с/г культур в Україні.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ДАНИХ ОКРЕМИХ ПОСІВІВ С/Г КУЛЬТУР

Для створення системи визначення площі посівів основних с/г культур в Україні за супутниковими даними на початковому етапі необхідним є визначення геоінформаційних даних (географічні координати) окремих с/г полів. Ця інформація отримується з мережі агро-, метеорологічних станцій Українського гідрометеорологічного центру України, на яких проводяться агрометеорологічні спостереження за окремими посівами с/г культур протягом усього вегетаційного періоду.

Особливістю геоінформаційних даних полів є можливість відображення і зіставлення їх з супутниковими даними в різних програмних середовищах QGIS, Google Engine та інші.

Запропонований метод визначення географічної інформації полів (тестових посівів) полягає в наступному:

- співробітник метеостанції виїжджає в поле і за допомогою GPS-пристрою визначає координати однієї точки в межах поля (мінімальна відстань від краю поля 50 метрів);

- електронною поштою передає заповнену таблицю всіх необхідних характеристик (географічні координати, інформація про тип культури, дата сівби, стан посіву, розмір поля, попередники та інше) в УкрГМЦ;

- за допомогою програмного забезпечення QGIS, ArcGIS визначається точка за відповідними координатами на супутниковому знімку високої роздільної здатності та створюється векторний об'єкт поля (рисунок 1);

- записується інформації по даному полю в атрибутивну таблицю шейп-файлу.



Рис. 1 – Приклад оцифрованого векторного об'єкта с/г поля за координатами однієї точки

Fig. 1 – The example of digitized vector object using one-point coordinates in the field

За цим методом визначення географічних координат здійснюється GPS-пристроєм. Найбільш оптимальним є використання мобільних пристроїв із вбудованими GPS модулями (телефон, планшет, ноутбук) та з підключенням до інтернету. В даному випадку було використано програмне забезпечення 3planeta.com.

3. МЕТОД КЛАСИФІКАЦІЇ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОКРЕМИХ ПОСІВВ С/Г КУЛЬТУР

3.1 Загальні концептуальні підходи класифікації супутникових зображень

Існує два загальних підходи, які використовуються для класифікації супутникових зображень: контрольована і неконтрольована класифікація. У контрольованій класифікації ідентифікуються певні типи земної поверхні, спираючись на вхідну інформацію, яка відома заздалегідь (тестова вибірка). За допомогою неконтрольованої класифікації система розділяє точку зображення на кластери, які пізніше класифікуються вручну. У даній роботі запропоновано використання контрольованої класифікації з огляду на можливості отримання додаткової інформації з агро- і метеорологічних станцій УкрГМЦ.

У контрольованій класифікації існують дві концепції: класифікація на основі точок (попиксельна) і об'єктна класифікація. Класифікація на основі точок здійснюється шляхом спроби класифікації кожного пікселя вихідного зображення незалежно один від одного. Класифікація на основі об'єктів полягає в групуванні пікселів

зображення в об'єкти (процес сегментації), після чого в даному підході класифікується кожен об'єкт, а не піксель.

У цих напрямках було проведено ряд досліджень, які порівнювали як класифікаційні концепції (піксельні і об'єктні) [4-11], так і класифікаційні алгоритми [12-15]. Згідно з вищевказаними роботами, в порівнянні піксельної і об'єктної класифікацій більш точною виявилась об'єктна, хоча в роботі [16], де проводилося порівняння піксельної і об'єктної концепцій для класифікації типів с/г угідь, було виявлено, що обидва підходи мають схожу точність, а об'єктна концепція класифікації мала проблеми, пов'язані з поглинанням маленьких рідкісних класів у великі об'єкти. У порівнянні класифікаційних алгоритмів найбільш точними виявилися наступні: SVM (Support Vector Machine), RF (Random Forest) і нейромережеві алгоритми NN (Neural Network).

3.2 Алгоритми класифікації супутникових зображень

SVM (Support Vector Machine) Метод опорних векторів. Цей контрольований підхід щодо машинного навчання часто використовують для вирішення задач класифікації. Робота методу опорних векторів базується на побудові гіперплощини, яка максимально розділяє дані з навчальної вибірки за певними ознаками (в нашому випадку цими даними є значення пікселів, їхнього спектрального ходу). Гіперплощина є математичною сутністю, що відділяє між собою класи об'єктів з однаковими ознаками. Гіперплощина обирається таким чином, щоб бути розташованою на максимальній відстані від елементів кожного з класів, тобто посередині деякої зони (максимальної межі), що відділяє між собою ці елементи.

RF (Random Forest). «Випадковий ліс». Метод машинного навчання, який полягає у використанні ансамблю дерев рішень (Decision Trees). Дерева відповідають на послідовні питання (або умови), відповідь на які спрямовує нас за певним маршрутом дерева (гілки). Глибина дерева є важливою концепцією даної моделі. Вона показує, скільки питань задано, перш ніж ми досягнемо нашої прогнозованої класифікації.

NN (Neural Network). Нейронні мережі. В даний час при виборі підходу до класифікації с/г культур за даними ДЗЗ кращими є нейромережеві методи [17]. Нейронна мережа - це розподілена паралельна обчислювальна архітектура, що складається з елементарних одиниць обробки

інформації, які накопичують експериментальні знання і надають їх для подальшого використання [18,19]. Іншими словами, це математична модель (і її програмна реалізація), яка побудована за принципом організації та функціонування біологічних нейронних мереж -- мереж нервових клітин живого організму. Використання нейронних мереж є ефективним підходом до статистичного розпізнавання образів. У практичних завданнях класифікації найчастіше застосовують нейронні мережі прямого поширення (відомі також як багаточаровий перцептрон або MLP), для навчання яких використовують різні модифікації методу градієнтного спуску [20].

У цій роботі для здійснення класифікації с/г угідь були застосовані вищеописані алгоритми (або класифікатори). Вибір найбільш точного з них становив основу загального методу класифікації. В якості вхідних даних (ознак) були використані значення спектральних характеристик червоного та інфрачервоного каналів повного набору безхмарних супутникових знімків в період вегетації.

4. ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЛАСИФІКАЦІЇ. ТЕСТОВІ РОЗРАХУНКИ

Програмні засоби були створені на мові програмування R (версія 3.5.1) з використанням бібліотек `maptools`, `raster`, `rgdal`, `randomForest` та `caret`.

4.1 Обробка та підготовка супутникових знімків

В період сезону вегетації 2018 року (березень - серпень) були завантажені лише два безхмарні супутникові знімки Landsat-8 для тестового регі-

ону Київської області 30.04.2018 та 1.06.2018. Ці знімки були оброблені на предмет радіометричної корекції і побудови маски с/г земель. Для того щоб побудувати маску с/г земель для супутникових знімків були використані векторні карти лісів, селищ, міст, садів, водойм і річок. Всі перераховані векторні карти були об'єднані в шейпфайл ділянок несільськогосподарського призначення. Після цього, створений шейпфайл був використаний для побудови маски сільськогосподарських земель, яка застосовувалася для супутникових знімків. По цій масці були створені вихідні растри (рисунок 2).

Алгоритм створення вихідних оброблених растрів, який зображений на рисунку 2, застосований для червоного і інфрачервоного каналів завантажених супутникових знімків. Після обробки растрів з них був скомпонований «стек» (коли растрові комірки накладаються одна на одну, вони перетворюються в готові до обробки дані типу «стек»). Сформований «стек» з 4 растрів (2 канали знімка за 30.04.2018 і 2 канали знімка за 01.06.2018) був використаний для екстракту радіометричних значень в межах тестових полів і подальшого навчання класифікаторів.

4.2 Створення тестової вибірки

Для створення тестової вибірки були зібрані дані з 117 полів загальною площею 4306 га (переважно в Київській області) в межах «стеку» супутникових знімків (рисунок 3).

По таблиці 1 можна виділити п'ятірку основних с/г культур тестової вибірки по площі посівів і кількості полів (кукурудза, соняшник, озима пшениця, ярий ячмінь і соя), що відповідає загальній картині розподілу с/г культур по області та країні в цілому.

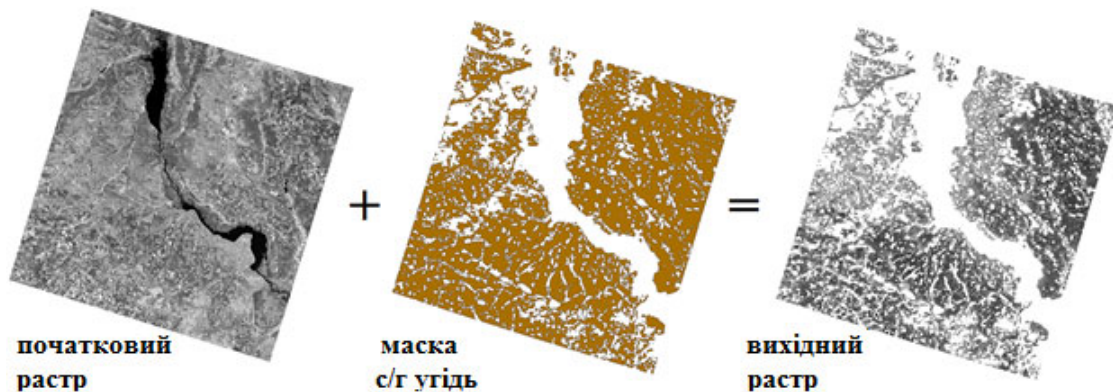


Рис. 2 - Схема виділення на растрі с/г угідь для подальшої класифікації
Fig. 2 – The scheme of image processing by agricultural mask

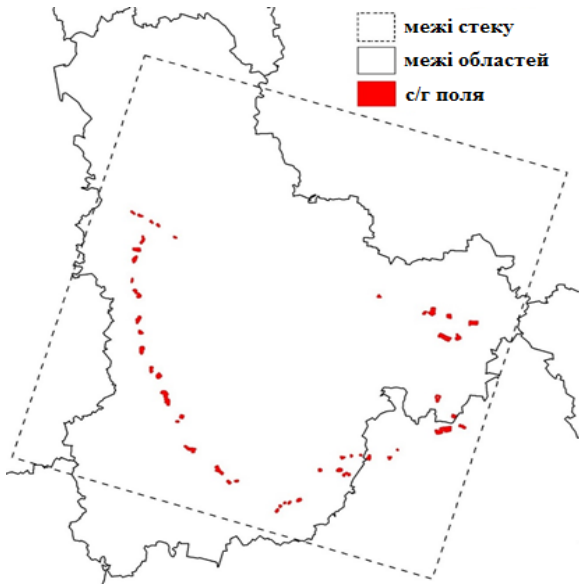


Рис. 3 – Маршрут для створення вибірки тестових полів
Fig. 3 – The route of fields test samples formation

Таблиця 1 – Розподіл с/г культур тестової вибірки по загальній площі посівів

Table 1 – Crop distribution within fields test samples by area

культура	площа (га)	кількість полів
кукурудза	1324	33
соняшник	955	23
озима пшениця	914	27
ячмінь	400	12
соя	349	11
ріпак	82	4
пар	66	1
цукровий буряк	60	1
горох	47	2
люцерна	41	1
картопля	40	1
гречка	28	1

4.3 Виконання тестових розрахунків для оцінки точності алгоритмів

На вхід класифікаторів подавалися значення «стеку» супутникових знімків в межах полів всієї тестової вибірки в двох варіантах: навчання з урахуванням всіх наявних класів (див. Таблицю 1), але з об'єднанням цукрового буряку і картоплі в клас коренеплоди і навчання з урахуванням 7 класів, де пар, цукровий буряк, горох, люцерна, картопля і гречка об'єднані в один клас під назвою «інші».

У зв'язку з незначною кількістю полів (для деяких культур по одному полю), точність класифікаторів перевірялася на всій тестовій вибірці

без поділу на навчальну і тестову («train/test») шляхом побудови матриці помилок. Матриця помилок є специфічною таблицею, яка дозволяє візуалізувати ефективність роботи алгоритму шляхом порівняння результатів прогнозованих класів з мітками фактичного класу: кожен стовпець відображає фактичний клас, тоді як рядки представляють прогнозні класи. Ці таблиці також дозволяють визначати плутанину класів, коли один клас класифікується як інший (звідси і назва «confusion matrix»). Точність класифікації певної культури дорівнює відношенню відповідного діагонального елемента матриці і суми всього рядка класу. Результуюча точність класифікатора розраховується як арифметичне середнє його точності по всіх класах. Записи в комірках таблиць представляють відсотки пікселів під відповідну культуру від загальної їхньої кількості (такий підхід використаний в роботі для спрощеного подання інформації).

Точність та результати класифікаторів SVM (Support Vector Machine або метод опорних векторів), RF (Random Forest або «випадковий ліс»), та NN (Neural Network або Нейронні мережі) по тестовій вибірці для двох варіантів 11 і 7 класів представлені в таблицях 2-7. Всі тестові культури в матрицях помилок позначені через цифри: 1 – озима пшениця, 2 – кукурудза, 3 – соняшник, 4 – ярий ячмінь, 5 – соя, 6 – ріпак, 7 – горох, 8 – коренеплоди, 9 – пар, 10 – люцерна, 11 – гречка, 12 – інші культури.

Майже більше половини пікселів, що за фактом відповідають посівам соняшнику, алгоритми SVM і NN класифікували як кукурудзу. Що стосується різної кількості класів (7 і 11), то різниця для всіх алгоритмів не суттєва. Для подальшої класифікації с/г культур в межах Київської області був застосований класифікатор RF, як найбільш точний.

З таблиць 2-7 видно, що найбільша точність класифікації притаманна алгоритму RF (більше 80%), а найменша -- алгоритму NN (менше 60%) в обох випадках (7 і 11 класів). Це пов'язано з тим, що для нейронних мереж (NN) потрібно більше вхідних ознак для більш точного результату, в той час як для методу «випадкового лісу» (RF) достатнім виявилось кілька ознак, щоб класифікувати с/г культури з хорошою точністю. Результати роботи класифікаторів SVM і NN мають низьку точність переважно через визначення посівів соняшнику як посівів кукурудзи.

Таблиця 2 – Матриця помилок класифікатора SVM для 11 класів (точність 0,6354)

Table 2 – Confusion matrix of SVM for 11 classes (accuracy 0,6354)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	15,62	0,04	0,00	0,83	0,00	0,03	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
2	0,16	25,51	11,62	0,57	6,41	0,00	0,20	0,75	0,00	0,00	0,01
3	0,00	3,24	9,45	4,13	1,21	0,00	0,45	0,02	0,00	0,00	0,54
4	1,71	0,15	2,02	5,93	0,05	0,00	1,19	0,00	0,00	0,00	0,03
5	0,02	0,15	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	6,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблиця 3 – Матриця помилок класифікатора SVM для 7 класів (точність 0,6535)

Table 3 – Confusion matrix of SVM for 7 classes (accuracy 0,6535)

	1	2	3	4	5	6	12
1	14,72	0,00	0,45	1,02	0,00	0,10	0,25
2	0,05	31,55	9,73	1,50	6,95	0,00	1,73
3	1,07	1,66	10,13	4,84	1,17	0,00	1,38
4	0,45	0,07	0,67	3,24	0,00	0,00	1,04
5	0,00	0,07	0,00	0,01	0,10	0,00	0,00
6	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	5,62	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблиця 4 – Матриця помилок класифікатора RF для 11 класів (точність 0,8242)

Table 4 – Confusion matrix of RF for 11 classes (accuracy 0,8242)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	15,95	0,20	0,20	0,40	0,00	0,22	0,04	0,00	0,00	0,04	0,00
2	0,22	29,16	3,88	0,66	2,89	0,07	0,04	0,27	0,00	0,00	0,20
3	0,18	2,23	17,16	0,37	0,90	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	0,18
4	0,15	0,16	0,20	6,64	0,09	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,18
5	0,02	1,06	0,46	0,02	4,39	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00
6	0,37	0,00	0,00	0,04	0,00	5,60	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
7	0,00	0,00	0,11	0,40	0,00	0,00	1,96	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,07	0,04	0,00	0,13	0,00	0,00	1,24	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00
11	0,00	0,11	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09

5. ВЕРИФІКАЦІЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩ ПОСІВІВ С/Г КУЛЬТУР ЗА СУПУТНИКОВИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ ЗІ СТАТИСТИЧНИМИ ДАНИМИ

Перші спроби застосування класифікатора на рівні адміністративних районів були невдалими, тому що розрахункові потужності комп'ютерів виявилися замалими для цього, а класифікувати

Таблиця 5 – Матриця помилок класифікатора RF для 7 класів (точність 0,8172)

Table 5 – Confusion matrix of RF for 7 classes (accuracy 0,8172)

	1	2	3	4	5	6	12
1	15,43	0,12	0,08	0,24	0,00	0,17	0,00
2	0,02	28,31	4,10	0,70	1,98	0,00	0,42
3	0,66	2,58	15,19	0,78	1,15	0,00	0,35
4	0,29	0,41	0,68	9,27	0,04	0,00	0,70
5	0,08	0,94	0,79	0,23	4,80	0,00	0,00
6	0,03	0,00	0,00	0,06	0,00	5,36	0,00
12	0,00	0,11	0,16	0,42	0,00	0,00	3,35

Таблиця 6 – Матриця помилок класифікатора NN для 11 класів (точність 0,5989)

Table 6 – Confusion matrix of NN for 11 classes (accuracy 0,5989)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	17,87	0,11	0,53	0,60	0,00	0,70	0,12	0,00	0,26	0,00	0,00
2	0,01	24,29	10,72	0,30	6,53	0,00	0,11	1,05	0,00	0,00	0,02
3	0,12	5,00	8,62	5,12	1,32	0,00	0,97	0,00	0,00	0,00	0,47
4	0,99	0,26	1,98	2,51	0,00	0,00	1,27	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,20	0,00	0,01	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,91	0,00	0,10	0,01	0,00	6,29	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00
7	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблиця 7 – Матриця помилок класифікатора NN для 7 класів (точність 0,5944)

Table 7 – Confusion matrix of NN for 7 classes (accuracy 0,5944)

	1	2	3	4	5	6	12
1	14,20	0,07	0,74	0,51	0,00	0,60	0,45
2	0,00	29,79	11,37	0,63	7,23	0,00	1,24
3	0,10	4,11	8,25	5,86	1,40	0,00	2,27
4	0,58	0,05	1,45	1,38	0,00	0,00	0,48
5	0,00	0,11	0,01	0,00	0,11	0,00	0,00
6	0,68	0,00	0,00	0,05	0,00	5,71	0,39
12	0,10	0,02	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00

кожен район по фрагментах (рисунок 4) з подальшою їхньою агрегацією занадто кропітка робота. Було знайдено рішення у вигляді «паралельних обчислень» (parallel processing), які полягають у розділенні процесу на частини та їхнє одночасне виконання на різних процесорах (у нашому випадку на різних ядрах комп'ютера).

Таким чином класифікатор був застосований на адміністративному рівні для районів, виділе-

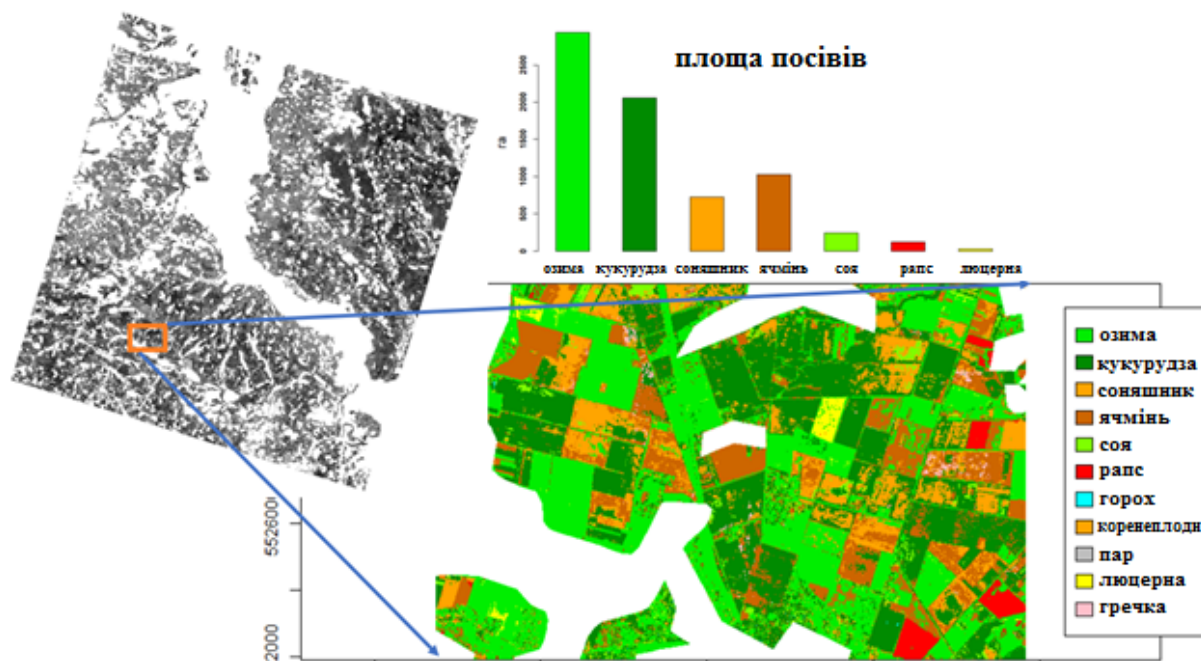


Рис. 4 – Приклад класифікації с/г посівів окремого фрагменту «стеку» в межах Київської області

Fig. 4 – The example of stack fragment classification in Kyiv region

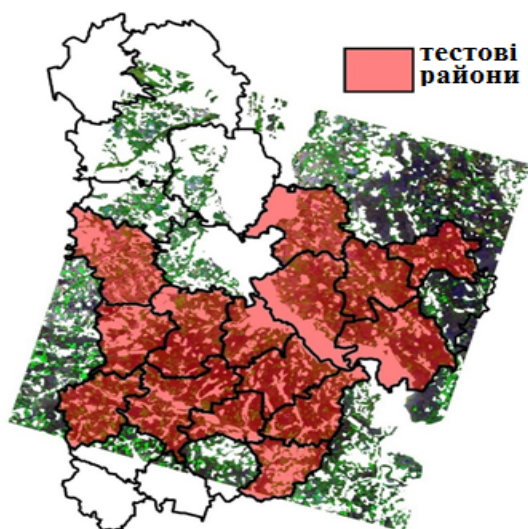


Рис. 5 – Тестові райони Київської області

Fig. 5 – Test districts in Kyiv region

них на рисунку 5. Для визначення площ посівів с/г культур за супутниковими даними на рівні адміністративних районів була обрана Київська область з наступних причин:

- наявність наземних даних (тестової вибірки) переважно в Київській області за 2018 рік;
- наявність статистичних даних площ посівів основних с/г культур (озима пшениця, кукурудза, соняшник, ячмінь, соя та ріпак), представлених в тестовій вибірці на районному рівні за 2018 рік;

- застосування алгоритму класифікації на районному рівні вимагає менше розрахункових потужностей комп'ютера, ніж, наприклад, на обласному.

На рисунку 5 виділені 15 тестових адміністративних районів Київської області, для яких був застосований класифікатор і визначено площі посівів основних с/г культур для подальшої верифікації отриманих результатів зі статистичними даними. Райони обрані за двома критеріями: а) наявність статистичних даних; б) розміщення району в межах «стеку» супутникових знімків.

Класифікатор послідовно застосований до Баршівського, Білоцерківського, Богуславського, Броварського, Бориспільського, Фастівського, Кагарлицького, Макарівського, Миронівського, Обухівського, Переяслав-Хмельницького, Рокишнянського, Сквирського, Васильківського та Згурівського районів. Приклад растрових зображень результатів класифікації для Миронівського, Бориспільського та Обухівського районів показано на рисунках 6-8.

Білий колір (або «порожнечі») в растрових зображеннях районів відповідає частинам території несільськогосподарського призначення, отримані шляхом реалізації пункту 3.1. У таблиці 8 вказані статистичні дані і результати класифікації, а також відносна і абсолютна похибки

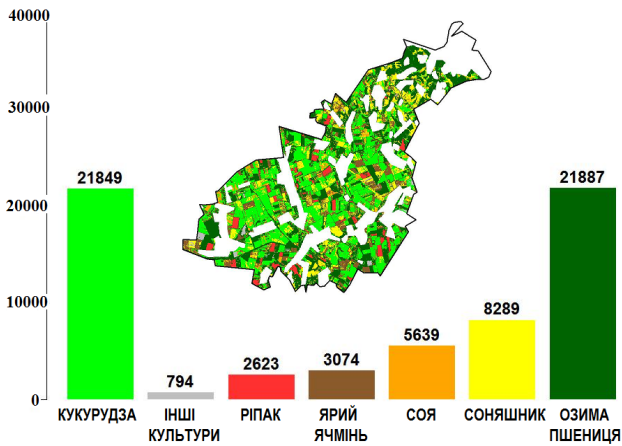


Рис. 6 – Результати класифікації Миронівського району, га

Fig. 6 – Classification results in Myronivskyi district, ha

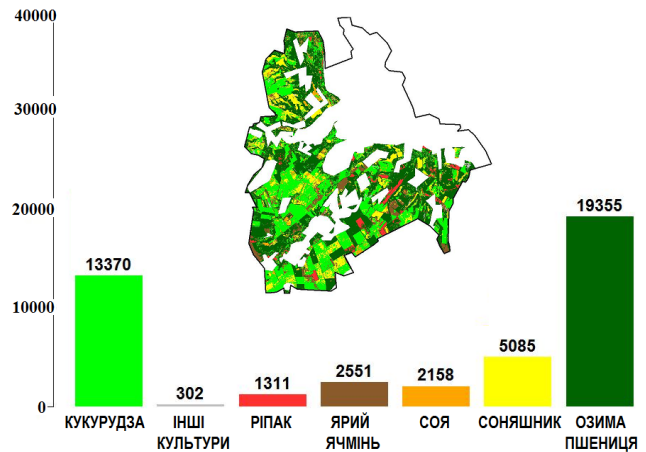


Рис. 8 – Результати класифікації Обухівського району, га

Fig. 8 – Classification results in Obukhiv district, ha

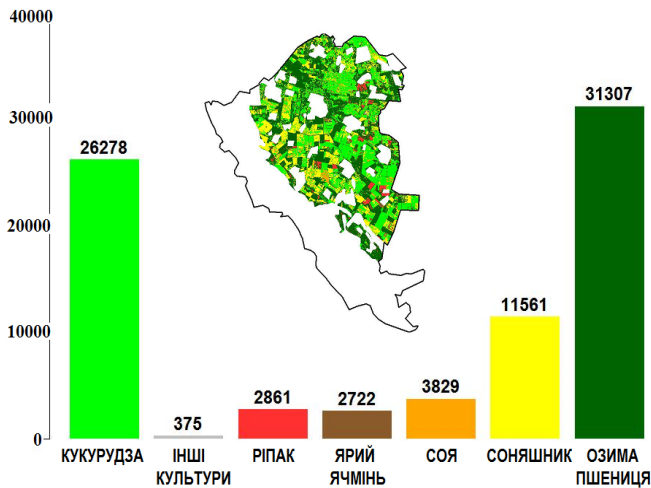


Рис. 7 – Результати класифікації Бориспільського району, га

Fig. 7 – Classification results in Borispil district, ha

між ними для основних с/г культур Миронівського, Бориспільського та Обухівського районів. З цієї таблиці видно, що площі посівів кукурудзи і озимої пшениці значно завищені в порівнянні зі статистичними даними (таке явище спостерігається і для інших 12 районів), що є результатом помилкової класифікації інших с/г угідь як класів кукурудзи і озимої пшениці. Це трапляється в умовах великої схожості часового ходу класифікаційних ознак (нагадаємо, що в нашому випадку це значення 2-х каналів знімка 30.04.2018 і 2-х каналів знімка 01.06.2018, які відповідають червоному і інфрачервоному спектрам) даних культур з іншими насадженнями (різнотрав'я, овочі, фруктові сади та ін.). Для поліпшення результатів класифікації озимої пшениці,

кукурудзи, а також сої та ячменю необхідно мати більшу кількість супутникових знімків (для створення більшої кількості класифікаційних ознак у часовому аспекті), а також збільшити кількість і площу тестової вибірки (наземних даних). Найкращі результати класифікації притаманні посівам соняшнику і ріпаку, середні відносні похибки яких по 14 районах (без урахування Васильківського) складають 21% і 23% відповідно.

За результатами проведеної класифікації основних с/г культур 2018 року в рамках тестових районів Київської області на базі 2-х супутникових знімків і тестової вибірки з 117 полів загальною площею 4306 га можна відзначити:

- найменша точність характерна для посівів озимої пшениці та кукурудзи;
- точність класифікації сої та ярого ячменю невисока для більшості тестових районів;
- найприйнятніша точність характерна для посівів соняшнику і ріпаку.

Для поліпшення точності класифікації необхідно:

- створювати більшу кількість класифікаційних ознак (у часовому аспекті), шляхом обробки більшої кількості супутникових знімків в період вегетації;
- збільшувати кількість і площу тестової вибірки шляхом систематичного відбору наземних даних по областях України через працівників агрометеорологічних станцій.

Таблиця 8 – Порівняння результатів класифікації із статистичними даними площ посівів основних с/г культур в Миронівському (М), Бориспільському (Б) та Обухівському (О) районах

Table 8 – Comparison of classification results with statistical data of main agricultural crops sown area in Myronivskiyi (M), Boryspil (B) and Obukhiv (O) districts

культура	район	статистичні дані, га	результат класифікації, га	відносна похибка, %	абсолютна похибка, га
ріпак	М	2915	2623	10	292
	Б	2585	2861	11	276
	О	1440	1311	9	129
соя	М	7645	5639	26	2006
	Б	4083	3829	6	254
	О	2562	2158	16	404
совишник	М	7864	8289	5	425
	Б	9481	11561	22	2080
	О	4505	5085	13	580
ярий ячмінь	М	1785	3074	72	1289
	Б	2292	2722	19	430
	О	1047	2551	144	1504
кукурудза	М	13097	21849	67	8752
	Б	15192	26278	73	11086
	О	7541	13370	77	5829
озима пшениця	М	5626	21887	289	16261
	Б	10357	31307	202	20950
	О	5249	19355	269	14106

6. СХЕМА СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩ ПОСІВІВ С/Г КУЛЬТУР ЗА СУПУТНИКОВИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ

Схема системи визначення площ посівів с/г культур по супутникових зображеннях, яка складається з декількох блоків і може бути реалізована в Українському гідрометеорологічному центрі, представлена на рисунку 9. Умовно, всі блоки можуть бути розділені на організаційно-виробничі (1-2) і науково-методичні (3-8). Короткий опис функціоналу кожного блоку представлено нижче.

Блок 1. Забезпечення працівників гідрометеорологічних станцій пристроями GPS. Відповідальними за виконання даного етапу роботи є адміністрація Українського гідрометеорологічного центру. Необхідно забезпечити працівників станцій будь-яким пристроєм, що має можливість визначати географічні координати (планшет, телефон або безпосередньо GPS-пристрій).

Блок 2. Роботи по визначенню географічних координат с/г посівів і створення атрибутивних таблиць. При наявності GPS пристрою праців-

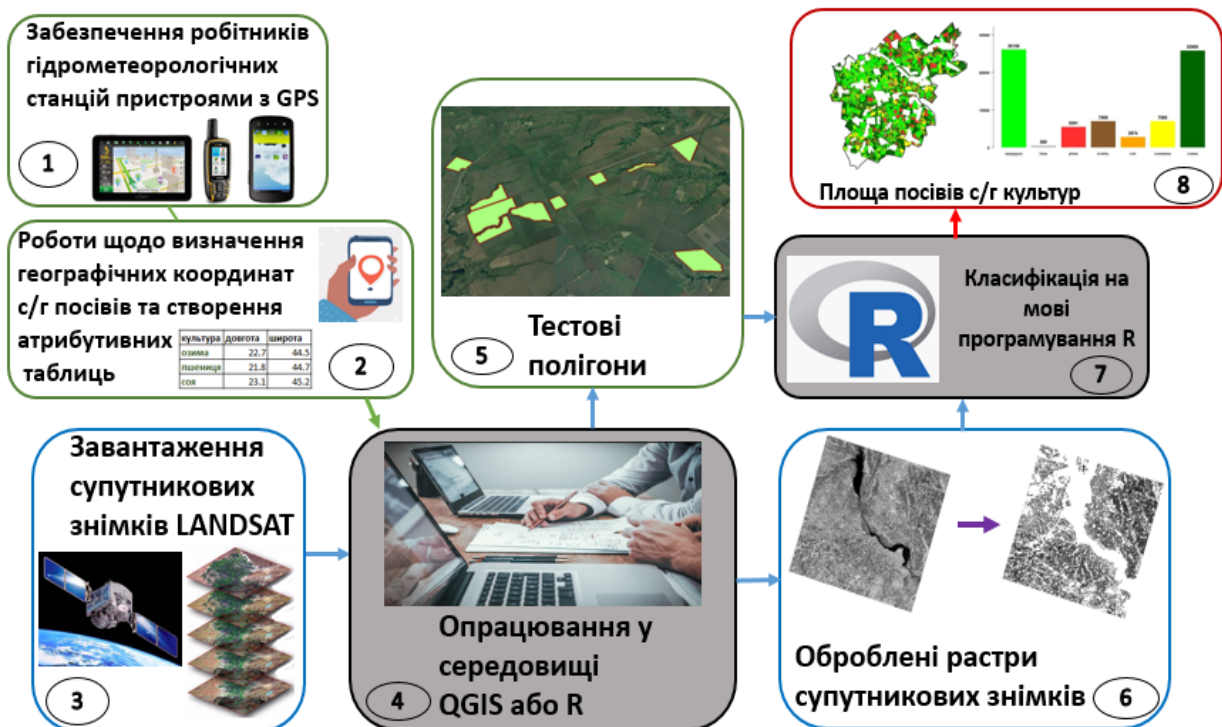


Рис. 9 – Схема системи визначення площ посівів с/г культур за супутниковими зображеннями
Fig. 9 – The scheme of area determining system of agricultural crops based on satellite data

ники гідрометеорологічних станцій повинні реалізувати алгоритм, який описаний в першому розділі даної статті. Результатом польових робіт з GPS-пристроєм повинна бути атрибутивна таблиця, що складається мінімум з трьох стовпців: культура, довгота і широта (таблиця 9).

Таблиця 9 – Приклад заповнення атрибутивної таблиці
Table 9- Application of attribution tables

культура	довгота	широта
кукурудза	31,628	49,958
соняшник	31,731	49,878
озима пшениця	31,649	49,813

Блок 3. Завантаження супутникових знімків LANDSAT, Sentinel-2 та інші. Супутникові знімки з роздільною здатністю 30 метрів доступні на сайті USGS <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Для зменшення похибок при класифікації необхідно завантажувати тільки безхмарні супутникові знімки в період вегетації с/г культур.

Блок 4. Опрацювання у середовищі GIS. Створені атрибутивні таблиці і завантажені супутникові знімки необхідно опрацювати в GIS середовищі (QGIS, R) для побудови тестових полігонів і оброблених растрів супутникових знімків, що будуть подаватися на вхід до класифікатора.

Блок 5. Тестові полігони (або тестова вибірка) є результатом оброблених атрибутивних таблиць в GIS середовищі. За допомогою GIS-технологій визначається точка за відповідними координатами на супутниковому знімку високої роздільної здатності та створюється векторний об'єкт поля (рисунок 1), в якому знаходиться дана точка (оцифровується вручну). Таким чином, послідовно всі точки атрибутивної таблиці перетворюються у векторні об'єкти полів. Створений вектор зберігається у форматі шейп-файлу (.shp) для подальшого використання в класифікаторі.

Блок 6. Оброблені растри супутникових знімків. В результаті обробки супутникових знімків LANDSAT на предмет радіометричної корекції і побудові маски с/г земель (див. Розділ 3) отримуємо растри для всіх спектральних каналів всіх завантажених знімків. Ці растри зберігаємо у форматі .tiff в окремій папці.

Блок 7. Класифікація на мові програмування R. Створений програмний код послідовно виконує три основні етапи:

- створення «стеку» з оброблених растрів супутникових знімків;
- навчання класифікатора «випадковий ліс»

з використанням створеного «стеку» і тестових полігонів;

- застосування навченого класифікатора до всього «стеку» або його окремих частин (довільна область -- рисунок 4, адміністративні райони - - рисунки 6-8).

Блок 8. Площа посівів с/г культур. Результатом роботи трьох основних етапів програмного коду є класифікація «стеку» супутникових знімків (або його окремих частин) і розрахунок площ посівів класифікованих с/г культур.

7. ВИСНОВКИ

Розроблена схема системи визначення площ посівів с/г культур по супутникових зображеннях, яка складається з 8 блоків для реалізації в Українському гідрометеорологічному центрі.

Розроблено метод класифікації багатоспектральних супутникових зображень для визначення окремих посівів с/г культур на основі аналізу відгуків спектральних каналів супутникових знімків. Метод полягає в комплексному застосуванні класифікаторів RF, SVM і NN, де в якості вхідних ознак використовуються значення всіх спектральних каналів безхмарних супутникових знімків в період вегетації з подальшим визначенням найбільш точного результату.

Створено програмні засоби для класифікації с/г посівів на мові програмування R (версія 3.5.1) з використанням бібліотек `maptools`, `raster`, `rgdal`, `randomForest` і `caret`. Програмні засоби послідовно виконують такі завдання: завантаження растрових зображень у форматі .tiff; підгонка всіх растрів під одну розрахункову область; створення «стеку» з растрів; екстракт значень «стеку» в межах тестових полів (шейпфайл тестових полів завантажуються попередньо); навчання класифікаторів; побудова матриці помилок.

Проведено тестові розрахунки класифікації с/г посівів Київської області в межах тестових полів. Визначено, що найбільш точний алгоритм класифікації для даного випадку -- RF («випадковий ліс»).

Проведена верифікація отриманих результатів по визначенню площ посівів с/г культур по супутникових зображеннях зі статистичними даними: найменша точність характерна для посівів озимої пшениці та кукурудзи; точність класифікації сої та ярого ячменю невисока для більшості тестових районів; найприйнятніша точність характерна для посівів соняшнику і ріпаку. Для поліпшення точності класифікації необхідно створювати більшу кількість класифікаційних

ознак (у часовому аспекті) шляхом обробки більшої кількості супутникових знімків в період вегетації, а також збільшувати кількість і площу тестової вибірки шляхом систематичного відбору наземних даних по областях України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клещенко А. Д. Оценка состояния зерновых культур с применением дистанционных методов. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. 345 с.
2. Клещенко А. Д., Вирченко О. В. К вопросу об использовании спутниковых данных при оперативном агрометеобслуживании народного хозяйства. *Труды ВНИИСХМ*. 1989. Вып. 25.
3. Кривобок А. А., Кривошеин О. О., Адаменко Т. И. Особенности технологической адаптации системы CGMS для мониторинга сельскохозяйственных посевов в Украине. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. №22. С.64-79. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.07>
4. Fernandez J. Analysis of Classification Algorithms for Crop Detection using LANDSAT 8 images / Universidade nova de Lisboa, 2015.
5. Oruc M, Marangoz A., Buyuksalih G. (2004). Comparison of pixel-based and object-oriented classification approaches using Landsat-7 ETM spectral bands. *Proceedings of the ISRPS 2004 Annual Conference*. 2004. Pp. 19–23.
6. Whiteside T., Ahmad W. A comparison of object-oriented and pixelbasedclassification methods for mapping land cover in northern Australia. *Proceedings of SSC2005 Spatial intelligence, innovation and praxis: The nationalbiennial Conference of the Spatial Sciences Institute*. 2005. Pp. 1225–1231.
7. Platt R. V., Rapoza L. (2008). An Evaluation of an Object-Oriented Paradigm for Land Use/Land Cover Classification. *The Professional Geographer*. 2008. 60(1). Pp. 87–100.
8. Zhou W., Troy A., Grove M. Object-based land cover classification and change analysis in the Baltimore metropolitan area using multitemporalhigh resolution remote sensing data. *Sensors*. 2008. 8(3). Pp. 1613–1636.
9. Mohan B. K., Ladha S. I. *CSRE. Comparison of object based and pixel based classification of high resolution satellite images using artificial neural networks*. IIT. Bombay, Mumbai, 2009.
10. Duro D. C., Franklin S. E., Dubé M. G. (2012). A comparison of pixel-based and object-based image analysis with selected machine learning algorithms for the classification of agricultural landscapes using SPOT-5 HRG imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2012. 118, Pp. 259–272.
11. Perpixel and object-oriented classification methods for mapping urban land cover extraction using SPOT 5 imagery / Jebur M. N., Mohd Shafri H. Z., Pradhan B., Tehrani M. S. *Geocarto International (ahead-of-print)*. 2013. pp. 1–15.
12. Huang C, Davis L., Townshend J. An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*. 2002. 23(4). Pp. 725–749.
13. Pal M., Mather P. M. An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. *Remote sensing of environment*. 2003. 86(4). Pp. 554–565.
14. Otukei J. Blaschke T. *Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010. 12. Pp. S27–S31.
15. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for landcover classification / Rodriguez-Galiano V., Ghimire B., Rogan J. et al. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2012. 67. Pp. 93–104.
16. Dingle Robertson L. King D. J. Comparison of pixel-and object-based classification in land cover change mapping. *International Journal of Remote Sensing*. 2011. 32(6).
17. Куцусль Н. М., Скакун С. В., Шелестов А. Ю. Анализ рисков чрезвычайных ситуаций на основе спутниковых данных. Модели и технологии. Киев: Наук. думка, 2014. 184 с.
18. Haykin S. *Neural Networks. A comprehensive Foundation*. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 768 p.
19. Bishop C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer Science + Business Media, 2006. 738 p.
20. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Learning representations by back-propagating errors. *Neurocomputing: foundations of research*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1988. Pp. 696–699.

REFERENCES

1. Kleshchenko, A. (1986). *Otsenka sostoyaniya zernovykh kul'tur s primeneniem distantsionnykh metodov*. [Assessment of grain crops state using remote sensing methods]. Leningrad: Gidrometeoizdat (in Russ.)
2. Kleshchenko, A. & Virchenko, O. (1989). K voprosu ob ispol'zovanii sputnikovykh dannykh pri operativnom agrometeoobsluzhivanii narodnogo khozyaystva [On the use of satellite data in the operational agrometeorological service of the national economy.]. *Trudy VNIISKHM [Proceedings of All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology]*, №25. (in Russ.)
3. Kyvobok, O., Kryvoshein, O. & Adamenko, T. (2018). [Peculiarities of technological adaptation of the cgms system for agricultural crops monitoring in Ukraine]. *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 22, pp. 64-79. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.07> (in Russ.)
4. Fernandez, J. (2015). *Analysis of Classification Algorithms for Crop Detection using LANDSAT 8 images*. Universidade nova de Lisboa.
5. Oruc, M., Marangoz, A. & Buyuksalih, G. (2004). Comparison of pixel-based and object-oriented classification approaches using Landsat-7 ETM spectral bands. *Proceedings of the ISRPS 2004 Annual Conference*, pp. 19–23.
6. Whiteside, T. & Ahmad, W. (2005). A comparison of object-oriented and pixelbasedclassification methods for mapping land cover in northern Australia. *Proceedings of SSC2005 Spatial intelligence, innovation and praxis: The nationalbiennial Conference of the Spatial Sciences Institute*, pp. 1225–1231.
7. Platt, R.V. & Rapoza, L. (2008). An Evaluation of an Object-Oriented Paradigm for Land Use/Land Cover Classification. *The Professional Geographer*, 60(1), pp. 87–100.
8. Zhou, W., Troy, A. & Grove, M. (2008). Object-based land cover classification and change analysis in the Baltimore metropolitan area using multitemporalhigh resolution remote sensing data. *Sensors*, 8(3), pp. 1613–1636.
9. Mohan, B.K., Ladha, S.I. (2009). *CSRE. Comparison of object based and pixel based classification of high*

- resolution satellite images using artificial neural networks. IIT Bombay, Mumbai.
10. Duro, D.C., Franklin, S.E., & Dubé, M.G. (2012). A comparison of pixel-based and object-based image analysis with selected machine learning algorithms for the classification of agricultural landscapes using SPOT-5 HRG imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, pp. 259–272.
 11. Jebur, M.N., Mohd Shafri, H.Z. et al. (2013). Perpixel and object-oriented classification methods for mapping urban land cover extraction using SPOT 5 imagery. *Geocarto International (ahead-of-print)*, pp. 1–15.
 12. Huang, C, Davis L., & Townshend, J. (2002). An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 23(4), pp. 725–749.
 13. Pal, M. & Mather, P.M. (2003). An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. *Remote sensing of environment*, 86(4), pp. 554–565.
 14. Otukey, J. & Blaschke, T. (2010). Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, pp. S27–S31.
 15. Rodriguez-Galiano, V. et al. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for landcover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, pp. 93–104.
 16. Dingle Robertson, L. & King, D.J. (2011). Comparison of pixel-and object-based classification in land cover change mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 32(6).
 17. Kussul, N., Skakun, S. & Shelestov, A. (2014) *Analiz riskov chrezvychaynykh situatsiy na osnove sputnikovykh dannykh [Satellite based emergency risk analysis]*. Kiev “Modeli i tehnologii”. (in Russ).
 18. Haykin, S. (1994). *Neural Networks. A comprehensive Foundation*. New Jersey: Prentice Hall.
 19. Bishop, C.M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer Science + Business Media.
 20. Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. & Williams, R.J. (1988). Learning representations by back-propagating errors. *Neurocomputing: foundations of research*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, pp. 696–699.

SATELLITE-BASED SYSTEM OF AREA ESTIMATION FOR MAIN AGRICULTURAL CROPS OF UKRAINE

O. O. Kryvoshein¹, O. A. Kryvobok¹, T. I. Adamenko²

¹ Ukrainian Hydrometeorological Institute,
37 Nauki av., 03028, Kyiv, Ukraine, krivoshein@uhmi.org.ua

² Ukrainian Hydrometeorological Center
6 Zolotovoritska str., 01601, Kyiv, Ukraine, adamenko@meteo.gov.ua

The article studies one of the most important issues of agricultural production maintenance – development of a system of crops area estimation in Ukraine. The objective of this paper is to describe the similar system that uses high resolution satellite data and operational agrometeorological data from the network of the Hydrometeorological Centre of Ukraine as input information. The system is based on step-by-step solving of the following tasks: obtaining geoinformation data for individual agricultural crops; development of methods for multispectral satellite images classification; development of software applications to automate the process of these images classification with subsequent classification of crop areas. The research uses the following algorithms (or classifiers) to classify the agricultural land: SVM (support vector machine), RF ("random forest") and NN (neural networks). The choice of the most accurate of them formed the basis of the general method of classification. The values of spectral characteristics of red and infrared channels of a complete set of cloudless satellite images during the growing period were used as input data (features). As a result, in 2018 some test calculations were conducted to estimate the area of agricultural crops in Kyiv Region. The results of evaluation of accuracy of the satellite-based agricultural crops area estimation using the statistical data showed that the lowest accuracy is typical for winter wheat and corn. The accuracy of soybeans and spring barley classification is quite low for most of the tested fields. Sunflower and rapeseed crops showed the highest accuracy. In order to improve the accuracy of classification, it is necessary to introduce more classification features (in a temporary aspect) by processing more satellite images during the growing period, and to increase the number of test samples through systematic sampling of ground data across the regions in Ukraine. We suggest using the scheme of main agricultural crops area estimation satellite-based system by the Hydrometeorological Centre of Ukraine.

Keywords: crops area estimation system, geoinformation data, classification, main agricultural crops.

СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ПОСЕВОВ ОСНОВНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР УКРАИНЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

А. О. Кривошеин¹, А. А. Кривобок¹, Т. И. Адаменко²

¹ Украинский гидрометеорологический институт,
03028, г. Киев, проспект Науки, 37, krivoshein@uhmi.org.ua

² Украинский Гидрометцентр, 01601 г. Киев, ул. Золоторотская 6-В, adamenko@meteo.gov.ua

В данной статье рассматривается один из актуальных вопросов обслуживания сельскохозяйственного производства -- создание системы автоматического определения площадей посевов основных сельскохозяйственных культур в Украине. Целью данной работы является описание подобной системы, использующей в качестве входной информации спутниковые данные высокого разрешения, а также оперативную агрометеорологическую информацию (тип культуры, дата сева, влажность почвы, фаза развития, географические координаты и др.) из сети Гидрометцентра Украины. В основу построения системы положено поэтапное решение следующих задач: определение геоинформационных данных для отдельных сельскохозяйственных посевов; разработка методов классификации многоспектральных спутниковых изображений; разработка программных средств для автоматизации процесса классификации этих изображений с последующим определением площадей посевов. В этой работе для осуществления классификации сельскохозяйственных угодий были применены следующие алгоритмы (или классификаторы): SVM (метод опорных векторов), RF (метод «случайного леса») и NN (нейронные сети). Выбор наиболее точного из них составлял основу общего метода классификации. В качестве входных данных (признаков) были использованы значения спектральных характеристик красного и инфракрасного каналов полного набора безоблачных спутниковых снимков в период вегетации. В результате были проведены тестовые расчеты по определению площадей посевов сельскохозяйственных культур в пределах Киевской области за 2018 год. Оценка точности полученных результатов, которая проводилась путем сопоставления результатов определения площадей посевов по спутниковым данным со статистическими данными, показала, что наименьшая точность характерна для посевов озимой пшеницы и кукурузы, точность классификации сои и ярового ячменя невысокая для большинства тестовых районов, наибольшая точность характерна для посевов подсолнечника и рапса. Для улучшения точности классификации необходимо создавать большее количество классификационных признаков (во временном аспекте), путем обработки большего количества спутниковых снимков в период вегетации, а также увеличивать количество и площадь тестовой выборки путем систематического отбора наземных данных по областям Украины через работников агрометеорологических станций. Разработана схема системы определения площадей посевов основных с/х культур в Украине по спутниковым данным, которую предлагается использовать в гидрометцентре Украины.

Ключевые слова: система определения площадей посевов; геоинформационные данные, классификация, основные сельскохозяйственные культуры.

Подання до редакції : 16. 11. 2020
Надходження остаточної версії : 09. 12. 2020
Публікація статті : 17. 12. 2020

УДК 556.531

ОЦІНКА РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОД РІЧОК БАСЕЙНУ СІВЕРСЬКОГО ДІНЦЯ ЗА ПОКАЗНИКОМ БСК5

Н. С. Лобода, І. В. Катинська, О. В. Смалій

Одеський державний екологічний університет,

вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,

natalie.loboda@gmail.com, irinakatinskaya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>, <https://orcid.org/0000-0001-9152-0471>

Актуальність роботи полягає у необхідності визначення екологічного статусу річок басейну Сіверського Дінця та оцінці можливостей досягнення «доброго екологічного стану» у сучасних кліматичних умовах та антропогенному навантаженні. Сіверський Донець є головною річкою східної України. На території водозбору розташовані великі індустріальні зони, серед яких знаходиться Донецький кам'яновугільний басейн та промислові комплекси міста Харків, які десятиріччями чинили вплив на якість поверхневих вод. У представлений роботі використана методика оцінки рівня забруднення вод та їх екологічного стану за гідрохімічним показником БСК5 (біохімічне споживання кисню протягом 5 днів).

Метою роботи є виявлення основних тенденцій змін якості води за гідрохімічним показником БСК5. Об'єктом дослідження є забруднення вод річок басейну Сіверського Дінця промисловими, комунально-побутовими, шахтними водами. Предметом дослідження є оцінка якісного стану вод за БСК5.

У роботі використані дані гідрохімічних спостережень на 7 створах головної річки та 7 притоках за період 1990-2015 рр. Головна увага приділена найбільш забрудненим річкам сходу України: Уди та Кривий Торець. Якість вод річки Уди у значній мірі визначається комунально-побутовими стічними водами м. Харків. Річка Кривий Торець відноситься до річок Донбасу, де значним є забруднення шахтними водами та водами промислових підприємств.

За середніми річними показниками БСК5 визначені рівні забруднення, екологічний стан та сапробність. Для порівняльного аналізу були розраховані емпіричні ймовірності появи тієї чи іншої характеристики забруднення у різних створах.

Установлено, що на річках водозбору Сіверського Дінця переважає тенденція до зменшення БСК5 на початку XXI сторіччя. Найбільші показники БСК5 спостерігалися на притоках Донбасу та річці Уди (нижче міста Харків), а також вище і нижче міста Лисичанськ, найменші – на річці Оскіл.

Виявлено, що на початку XXI сторіччя води головної річки знаходяться у «пороговому» екологічному стані (β -мезосапробна зона), за виключенням створу Лисичанськ, де цей стан є «незворотно зміненим» через надходження до Сіверського Дінця забруднених вод річок Донбасу.

Дослідження якості вод річки Уди вище та нижче промислового міста Харків показали, що у верхній течії цієї річки води класифікуються як «чисті» та «помірно забруднені», а екологічний стан у майбутньому може набутися статусу «доброго». Нижче міста води переважно «брудні», а екологічний стан є «незворотно зміненим», α -мезосапробна зона. Для річки Кривий Торець (Донбас) через вплив органічного забруднення екологічний стан визначений як «пороговий» та «незворотно змінений», у останні роки став погіршуватися.

Для покращення екологічного стану річок Донбасу необхідно зменшення скидів у поверхневі водотоки неочищених комунально-побутових та промислових вод, а також будівництво очисних споруд сучасного рівня.

Ключові слова: річка Сіверський Донець, біохімічне споживання кисню, рівень забруднення органічними речовинами, екологічний стан, зона сапробності

1. ВСТУП

Актуальність роботи полягає у необхідності визначення екологічного статусу річок басейну

Сіверського Дінця та можливості їх відновлення до «доброго екологічного стану», що відповідає вимогам Водної Рамкової Директиви (ВРД) ЄС

(ВРД ЄС 2000/60/ЄС, 2006; Directive 2000/60/EC, 2000) [1]. Особливістю даних спостережень на річках України є те, що в них найбільш висвітлені матеріали щодо хімічного складу вод. У даній роботі оцінка якості вод виконана за показником *БСК5* згідно із методикою, запропонованою у роботі [2]. На основі цього показника можна опосередковано визначати якість поверхневих вод, ступінь забруднення води та стан водної екосистеми за рівнем сапробності. Сапробність характеризує ступінь насичення води органічними речовинами, які, як правило, не мають токсичної дії. Біохімічне споживання кисню (*БСК*) показує кількість кисню, яка споживається мікроорганізмами при окислюванні органічних речовин, тому *БСК* може розглядатися як оцінка загального забруднення органічними речовинами. Найчастіше вживається значення *БСК5* – біохімічне споживання кисню протягом 5 діб і *БСКнов* (*БСК20*) – повне біохімічне споживання кисню, закінчення якого визначається початком процесу нітрифікації і настає, як правило, через 15-20 діб [3].

Встановлено, що витрачання кисню й окиснення органічних речовин, які легко окиснюються, проходить із затухаючою швидкістю, пропорційно їх вмісту у воді. У природних водах, в яких *pH* змінюється від 6 до 8, за 5 діб при температурі 20 °С окиснюється близько 70 % легкоокиснюваних органічних речовин, а за 10 і 20 діб – відповідно 90 і 99 % [4].

Метою роботи є виявлення основних тенденцій змін якості води за показником якості *БСК5*. Головна увага приділена найбільш забрудненим річкам сходу України: Уди та Кривий Торець [5]. Річка Уди підлягає забрудненню комунально-побутовими стічними водами м. Харків. У роботі розглянуті два створи: вище міста Харків та нижче міста. Річка Кривий Торець відноситься до річок Донбасу, де значним є забруднення шахтними водами та водами промислових підприємств [6]. *Об'єктом* дослідження є ступінь забруднення вод річок басейну Сіверського Дінця промисловими, комунально-побутовими, шахтними водами. *Предметом* дослідження є оцінка якісного стану вод за показником *БСК5*.

Робота виконана в рамках науково-дослідної роботи кафедри гідроекології та водних дослі-

джень Одеського державного екологічного університету «Оцінка антропогенного впливу на водні екосистеми», термін виконання проекту: 2018-2022 рр. № держ. реєстр. 0118U001220. Останні дослідження авторів з проблеми оцінки якості поверхневих вод річок басейну Сіверського Дінця наприкінці ХХ та початку ХХІ сторіччя наведені у публікаціях [7, 8]. У цих роботах представлені результати дослідження динаміки змін якості вод у часі та просторі на базі використання різних показників якості, таких як коефіцієнт забруднення χ , модифікований індекс забруднення ІЗВ, узагальнений індекс стану вод I_{CB} , узагальнений екологічний індекс, визначений за державною методикою. У роботі [9] розглянутий вплив водності на формування якості вод. Оцінки антропогенних навантажень на річки басейну Сіверського Дінця у відповідності із впровадженням в дію положень Водної рамкової директиви представлені у публікації [10]. До числа невирішених проблем відноситься пошук найбільш ефективних показників якості вод на водозборах із значним антропогенним навантаженням.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі використані дані гідрохімічних спостережень на 7 створах головної річки та 7 притоках за період 1990-2015 рр. Рівень забруднення органічними речовинами та екологічний стан водного об'єкту визначалися за методикою, описаною у роботі [2], де наведена класифікація якості водного середовища в залежності від значень концентрацій *БСК5* в поверхневих водах (табл. 1).

За ступенем забруднення органічними речовинами води поділяються на полі-, мезо- та оліго-сапробні (табл. 2). Одним з основних показників при оцінці сапробності водних об'єктів є кількісна характеристика наявності або відсутності у води вільного кисню. Чим більший ступінь забруднення органічними речовинами, тим більша кількість кисню O_2 використовується на окислення, і тим менше залишається його у воді [3].

Полісапробні води характеризуються наявністю значної кількості білків, поліпептидів, вуглеводнів, а також лише слідовими концентраціями кисню та накопиченням у воді діоксиду вуг-

лецю, сірководню й метану. Показник біохімічного споживання кисню БСК5 в таких водах становить близько 40 мгО₂/дм³. Полісапробні води формуються в річках і закритих водоймах, в які скидають господарсько-побутові води та стічні води харчових і інших виробничих підприємств.

Таблиця 1 – Класифікація якості вод за величиною БСК5 [2]

Table 1 – Classification of water quality by the BOD5 value [2]

Рівень забруднення	Концентрація БСК5, мгО ₂ /дм ³	Екологічний стан водного об'єкту
Дуже чисті	0,5–1,0	Стадія зворотних змін
Чисті	1,1–1,9	
Помірно забруднені	2,0–2,9	Порогова стадія
Забруднені	3,0–3,9	Стадія незворотних змін
Брудні	4,0–10,0	

Таблиця 2 – Класифікація якості вод за ступенем забруднення органічними речовинами [2]

Table 2 – Classification of water quality by the level of organic pollution [2]

Концентрація БСК5, мгО ₂ /дм ³	Сапробність
12-40	полісапробні води
4-12	α-мезосапробні води
1,7-4	β-мезосапробні води
0,5≤1,6	олігосапробні води
0≤0,5	катаробні води

В мезосапробних водних об'єктах ступінь забруднення менш виражена, відсутні білки, більше кисню, значно менше диоксиду вуглецю та сірководню. Одночасно води містять недоокислювані азотисті сполуки: аміак, аміно- та амідокислоти.

В залежності від рівня забруднення органічними речовинами та наявності представників окремих таксономічних груп гідробіонтів мезосапробні води діляться на α- і β-мезосапробні.

Води α-мезосапробної зони характеризуються наявністю амміаку, нітритів, амідо- та амінокислот. Мінералізація органічної речовини в таких водах відбувається за рахунок аероб-

ного окислення за рахунок бактерій. Показник БСК5 для таких вод становить приблизно 4-12 мгО₂/дм³.

В β-мезосапробних водах в значно меншій кількості міститься амонійний і нітритний азот, переважають нітрати. Сірководень спостерігається лише у слідових концентраціях. Відмічається деякий дефіцит кисню у воді, але слабо виражений. Органічні речовини мінералізуються шляхом повного окислення. БСК5 дорівнює в середньому 1,7-4 мгО₂/дм³.

Води слабо-забруднених річок, озер, водосховищ, в яких відбувається інтенсивна мінералізація органічних речовин, найчастіше характеризуються як олігосапробні. В таких водних об'єктах завдяки високій концентрації розчиненого кисню переважають окислювальні процеси. Зі сполук азоту в них містяться нітрати, незначна кількість вугільної кислоти і відсутній сірководень. Значення БСК5 не перевищує 1,6 мгО₂/дм³, що свідчить про низький вміст органічних речовин у воді.

Особливо чистими за системою сапробності вважаються катаробні води. Такі води перенасичені киснем, в них відсутній діоксид вуглецю і сірководень. Показник БСК5 дуже низький, що свідчить про мінімальний вміст органічних речовин [3].

3. ОПИС І АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Хронологічний хід показника БСК5 у створах спостережень на головній річці показує загальну тенденцію до його зменшення (рис. 1). За рибогосподарськими нормами показник БСК5 не повинен перевищувати 2 мгО₂/дм³. Згідно із класифікаціями, наведеними у табл. 1 та табл. 2, виявлено, що наприкінці минулого сторіччя за показником БСК5 води характеризуються як «брудні», в стадії «незворотних змін» і входять у α- мезосапробну зону. Починаючи з 2000 року, ситуація стабілізувалася. Показник БСК5 приймає значення, які коливаються у межах від 1 до 2,5 мгО₂/дм³ («помірно забруднені» води, екологічний стан «пороговий»), води відносяться до β- мезосапробних. Лише в створі Лисичанськ (вище та нижче міста) у період 2000-2015 рр. показник БСК5 коливається від 3,8 до 5,0 мгО₂/дм³ (стадія «незворотних змін» екологічного стану річки). На притоках показник БСК5 перевищує значення 4 мгО₂/дм³ на таких річках як Уди (9 км нижче міста Харків), Бахмутка,

Казенний Торець, Кривий Торець, Лугань (рис. 2). Рівень забруднення їх вод за BCK_5 віднесений до «забруднених» та «брудних», а їх екологічний стан характеризується як «незворо-

тно змінений». Значення показника BCK_5 , які менші $2 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$, спотерігаються на річках Оскіл та Уди (10 км вище міста Харків).

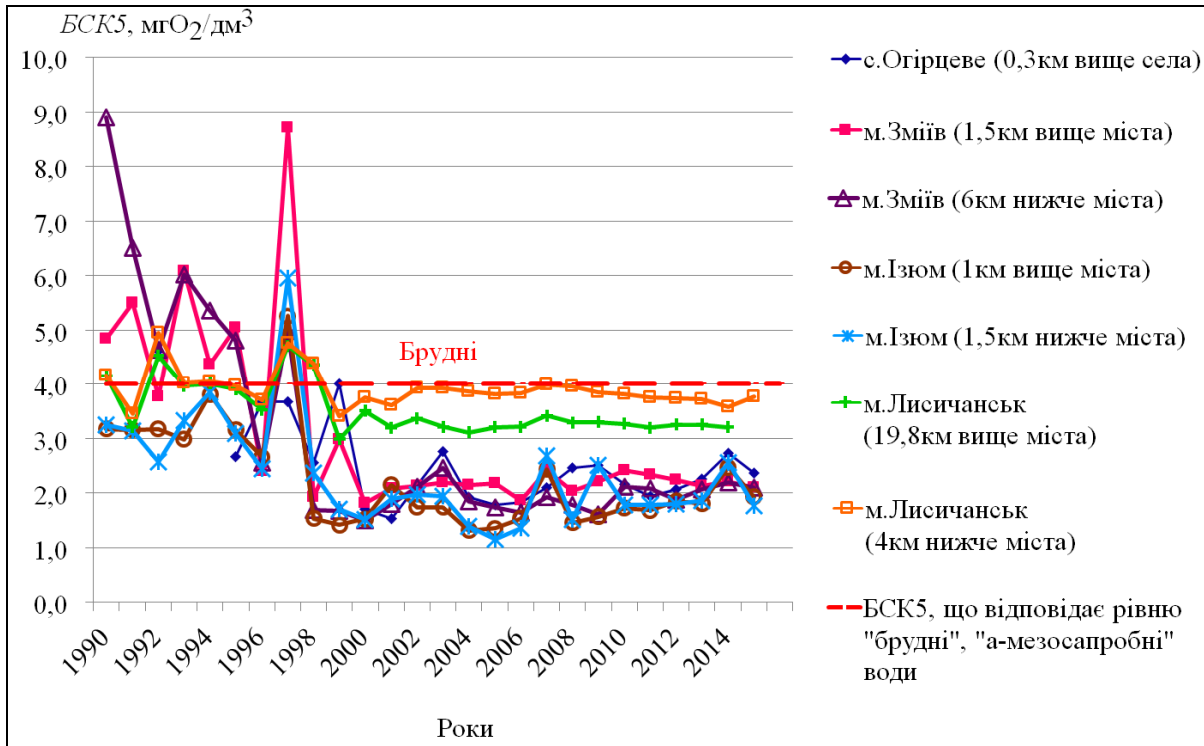


Рис. 1 – Хронологічний хід показника якості води BOD_5 по довжині головної річки
 Fig. 1 – Chronological order of the water quality indicator BOD_5 along the length of the main river

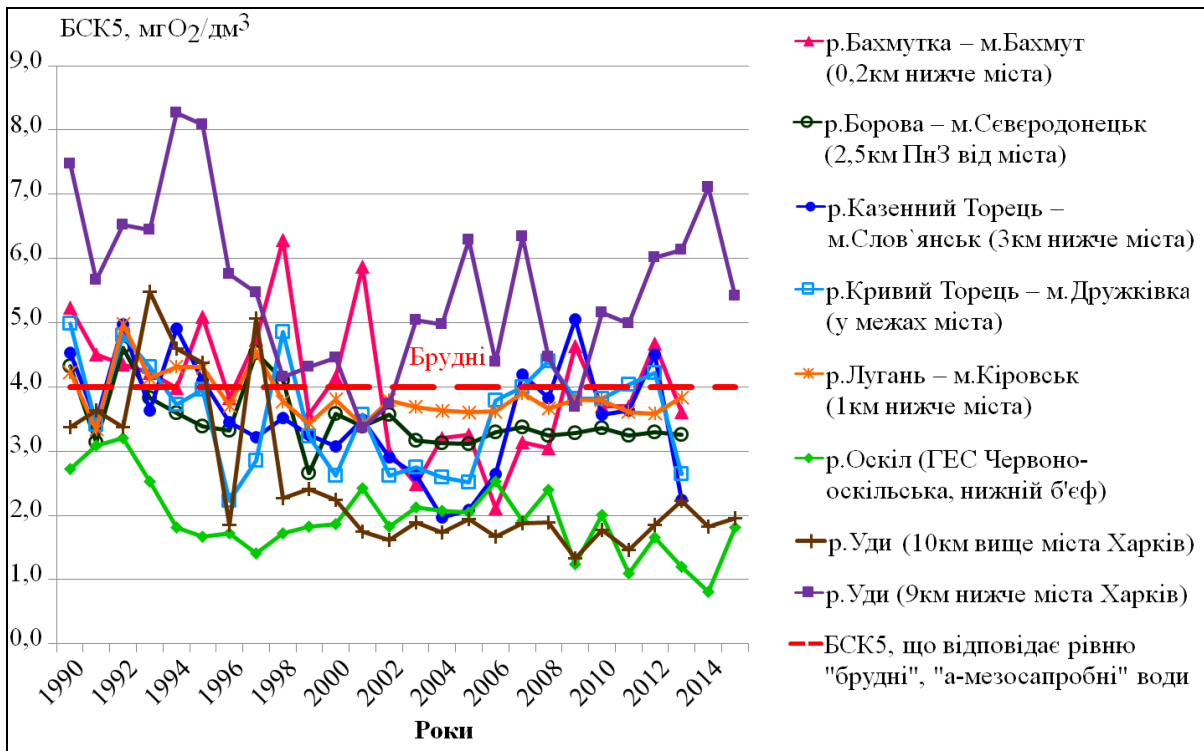


Рис. 2 – Хронологічний хід показника якості води BOD_5 на притоках річки Сівєрський Донець
 Fig. 2 – Chronological order of the water quality indicator BOD_5 on the tributaries of Siverskyi Donets River

Для більш детального аналізу були обрані притоки Уди (вище та нижче міста Харків) та Кривий Торець (річка Донбасу). Річка Уди є найбільш забрудненою водною артерією не тільки Харківської області, а і всієї України. В її басейн скидається 76 % (218 млн. м³) всіх зворотних вод Харківської області, перш за все комплексами біологічної очистки «Диканівським» та «Безлюдівським», а також Роганським і Есхарівським управліннями житлово-комунального господарства (ЖКГ), санаторієм «Бермінводи» та Харківською ТЕЦ-5. Від 24 до 84 % забруднюючих речовин, які формують якість річки Сіверський Донець в транскордонних створах, утворюються саме в басейні річки Уди [11]. Більше 80 % забруднень, що надходять в річку доводиться на неочищений поверхневий стік з території міста, що призводить до замулювання русел, забруднення вод, порушення гідрологічного режиму та технічного стану річок [12]. Вплив комунально-побутових вод проявляється у зростанні концентрацій сполук азоту, що добре видно при порівнянні графіків перевищення ГДК у створах річки Уди: вище 10 км від міста Харків (рис. 3) та нижче від міста Харків на 9 км (рис. 4). Якщо значення БСК5 у створі вище міста Харків знаходяться у допустимих межах (менше 2 мгО₂/дм³, див. рис. 2), то нижче міста

вони досягають 7 мгО₂/дм³.

Води річки Кривий Торець сильно забруднені господарсько-побутовими, промисловими, стічними і шахтними водами. Все це обумовлює неприпустимо високий вміст у її водах органічних, а в багатьох випадках і токсичних речовин. факторами, які обмежують використання вод річки Кривий Торець для питного водопостачання, є також висока мінералізація і жорсткість, підвищена концентрація сульфатів [13].

Для технічного водопостачання лімітуючими факторами придатності води є великий вміст мінеральних речовин, що обумовлюють високу мінералізацію і жорсткість води, наявність хлоридів і сульфатів, що викликають корозію будівельних матеріалів і металів. Для багатьох видів промисловості вода річок непридатна для водопостачання через наявність в ній сполук заліза, марганцю, свинцю, цинку і органічних речовин. Через забруднення шахтними водами, води річки містять велику кількість сульфатів, які агресивні по відношенню до бетонів та металу.

Для річки Кривий Торець – м. Дружківка при розгляді багаторічного періоду основною забруднювальною речовиною найбільше перевищення ГДК є азот нітритний (рис. 5).

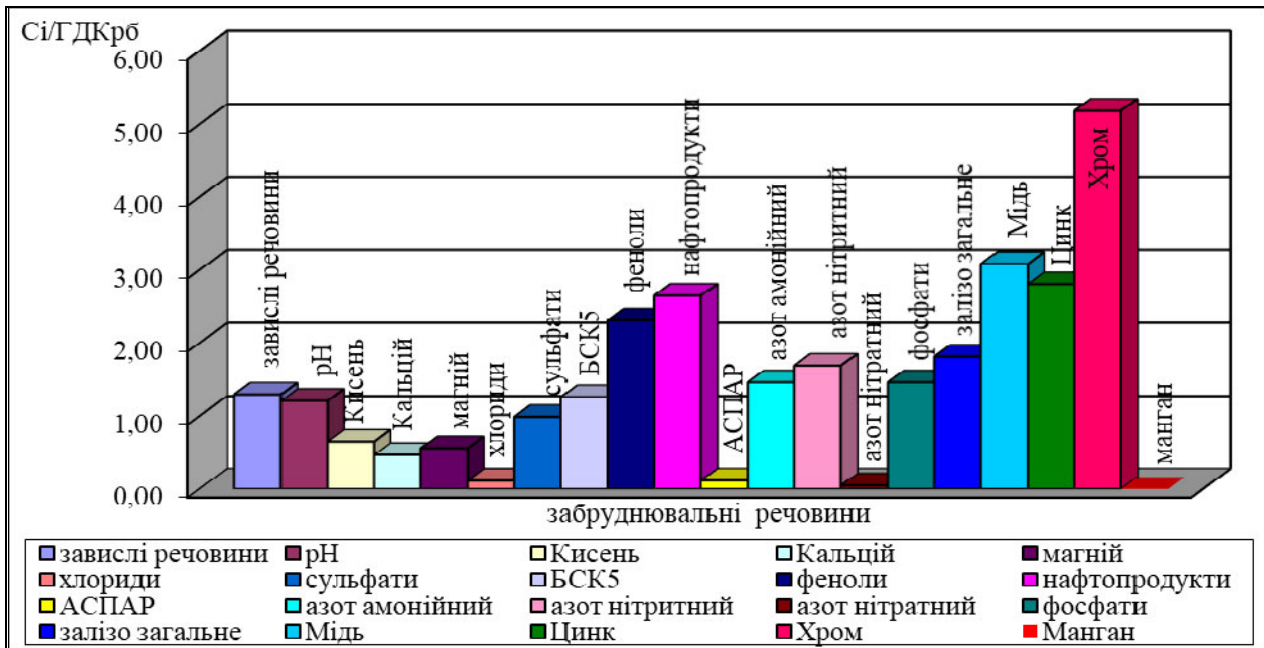


Рис. 3 – Перевищення ГДК рибогосподарського використання середніми багаторічними значеннями концентрацій у створі р. Уди – м. Харків 10 км вище міста

Fig. 3 – Exceeding the MPC for fishery use by average multi-valued concentrations in the observation point Udy River – 10 km upstream from Kharkiv City

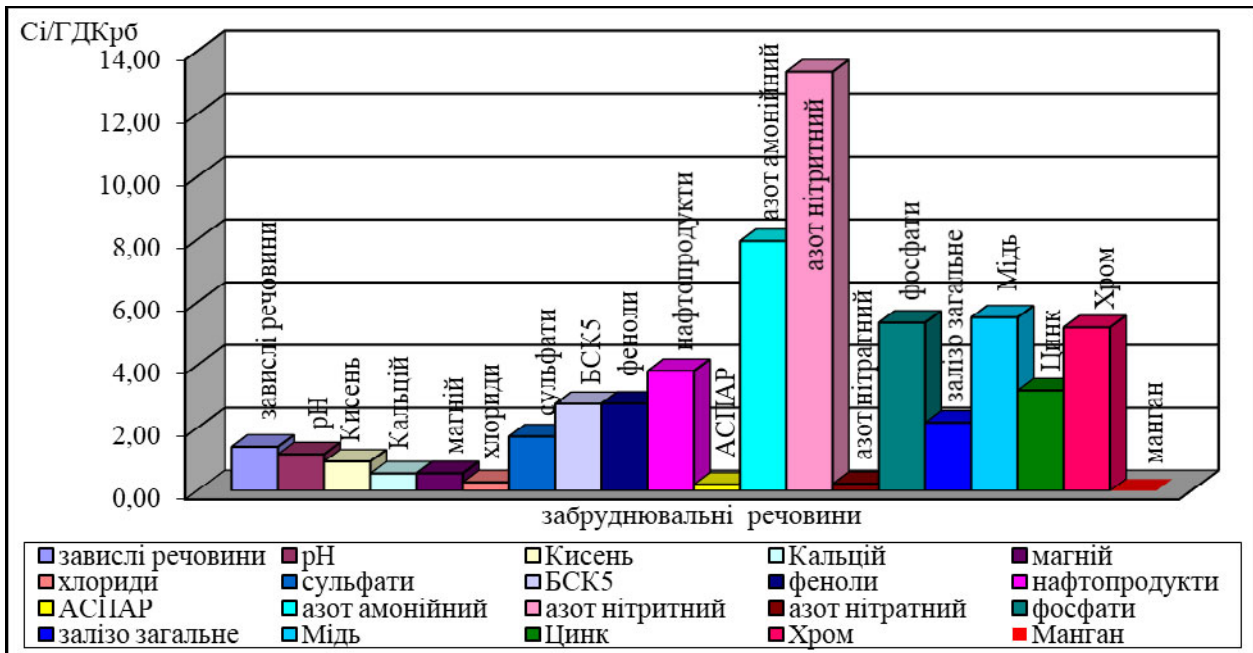


Рис. 4 – Перевищення ГДК рибогоподарського використання середніми багаторічними значеннями концентрацій у створі р. Уди – м. Харків 9 км нижче міста
Fig. 4 – Exceeding the MPC for fishery use by average multi-valued concentrations in the observation point Udy River – 9 km downstream from Kharkiv City

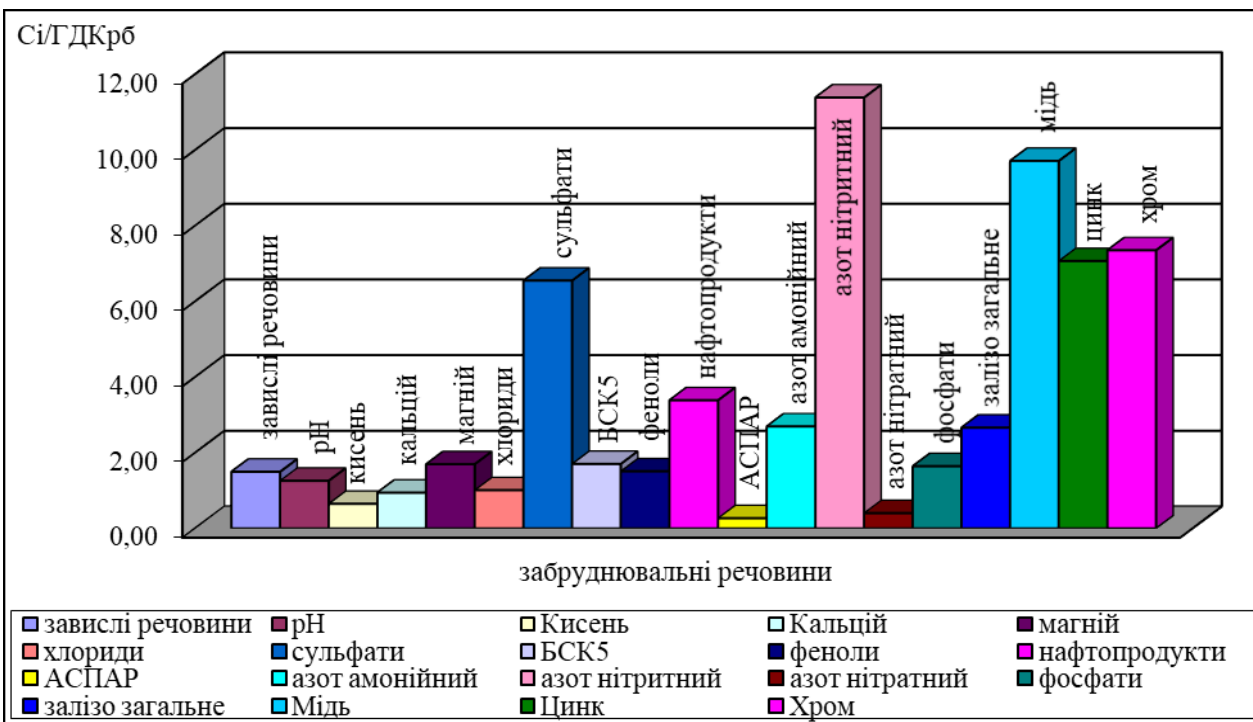


Рис. 5 – Перевищення ГДК рибогоподарського використання середніми багаторічними значеннями концентрацій у створі р. Кривий Торець – м. Дружківка [10]
Fig. 5 – Exceeding the MPC for fishery use by average multi-valued concentrations in the observation point Kryvyi Torets River – town Druzhkivka [10]

Вміст заліза, сульфатів, фенолів, солей важких металів в річковій воді перевищує допустимі норми в кілька разів. Основним джерелом забруднення є полігон промислових відходів поблизу

Костянтинівки, ВУВКГ «Костянтинівка» із об'ємом скидів 3739 тис. м³/рік. Також в районі населеного пункту Горлівка в р. Кривий Торець потрапляють шахтні води [14].

Для порівняльного аналізу за рядами середніх річних показників забруднення органічними речовинами нами були визначені емпіричні ймовірності їх появи (табл. 3). З цієї таблиці витікає, що найвищим рівнем забруднення органічними речовинами характеризується річка Уди у створі, який розташований нижче міста Харків.

Її екологічний стан класифікується як «незворотно змінений», що означає можливість недосягнення екологічних цілей. Хронологічний хід значень БСК5, взятих по кожній пробі (загальна кількість значень – 309), ілюструє, що на початку ХХІ сторіччя забруднення органічними речовинами практично не зменшилося (рис. 6).

Води річки Уди вище скидів з міста Харків, навпаки, набагато чистіші. Відносна частота появи екологічного стану “зворотні екологічні

зміни” складає 54 % і разом із «пороговим станом» – 73 %. Значення концентрацій БСК5 суттєво зменшилися, починаючи з середини 90-х років минулого сторіччя (рис. 7). Таким чином, за відсутності скидів з міста Харків приведення р. Уди до «доброго екологічного стану» було б цілком можливим.

Води річки Кривий Торець за багаторічний період класифікуються як «брудні» (32 %), забруднені (28 %), «помірно забруднені» (40 %), що в сумі становить 100 %. Екологічний стан визначений як «пороговий» у 40 %, і у 60 % як «незворотний». У хронологічному ході концентрацій БСК5 розглянутому по пробах (рис. 8) видно тенденцію до покращення, але рівень забруд-

Таблиця 3 – Емпіричні ймовірності появи показників забруднення, установлені за показником БСК5
Table 3 – Empirical probabilities of pollution indicators established by the BOD5 value

Річка-створ	Відносна частота появи «брудних» вод, %	Відносна частота появи стадії «незворотних змін» екологічного стану”, %	Відносна частота попадання у α -мезосапробну зону, %	Відносна частота попадання у β -мезосапробну зону, %
р. Уди – м. Харків (10 км вище міста)	15	27	15	77
р. Уди – м. Харків (9 км нижче міста)	85	100	85	15
р. Кривий Торець – м. Дружківка	32	60	32	68

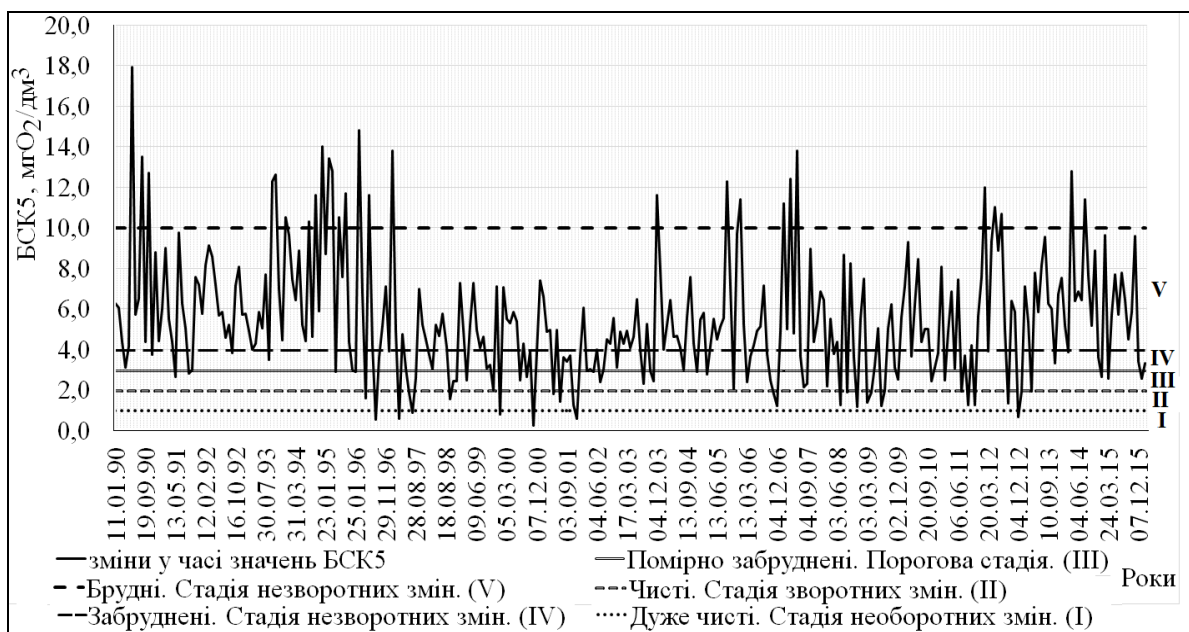


Рис. 6 – Мінливість значень показника БСК5 по датах відбору проб у пункті спостережень р. Уди – м. Харків 9 км нижче міста

Fig. 6 – Variability of BOD5 values by sampling dates in the observation point Udy River – 9 km downstream from Kharkiv City

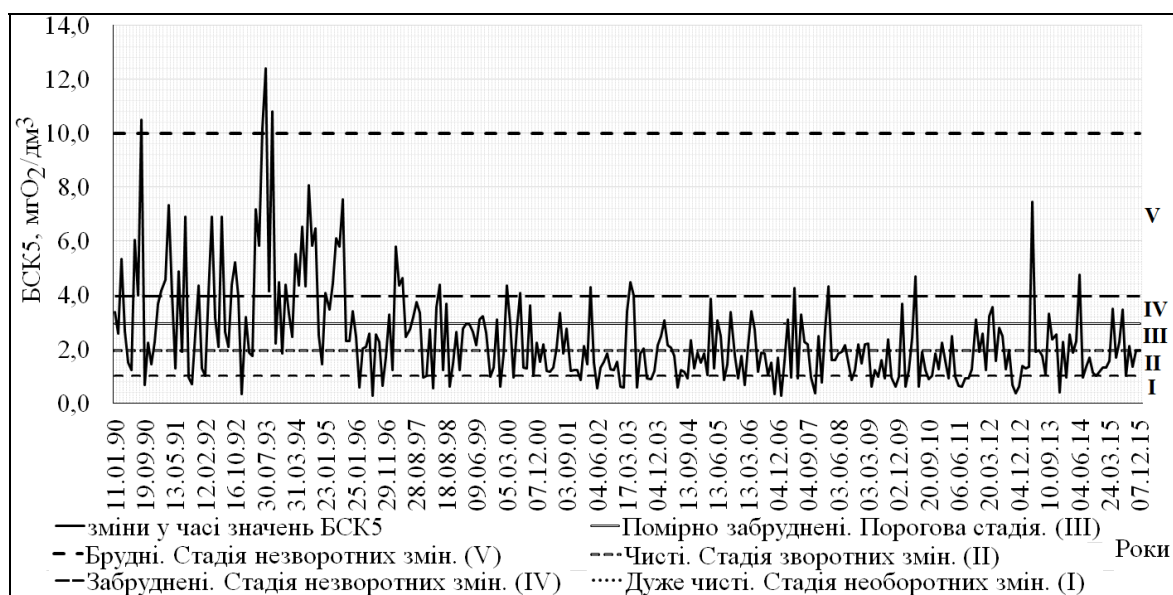


Рис. 7 – Мінливість значень показника *BCK5* по датах відбору проб у пункті спостережень р. Уди – м. Харків 10 км вище міста

Fig. 7 – Variability of *BOD5* values by sampling dates in the observation point Udy River – 10 km upstream from Kharkiv City

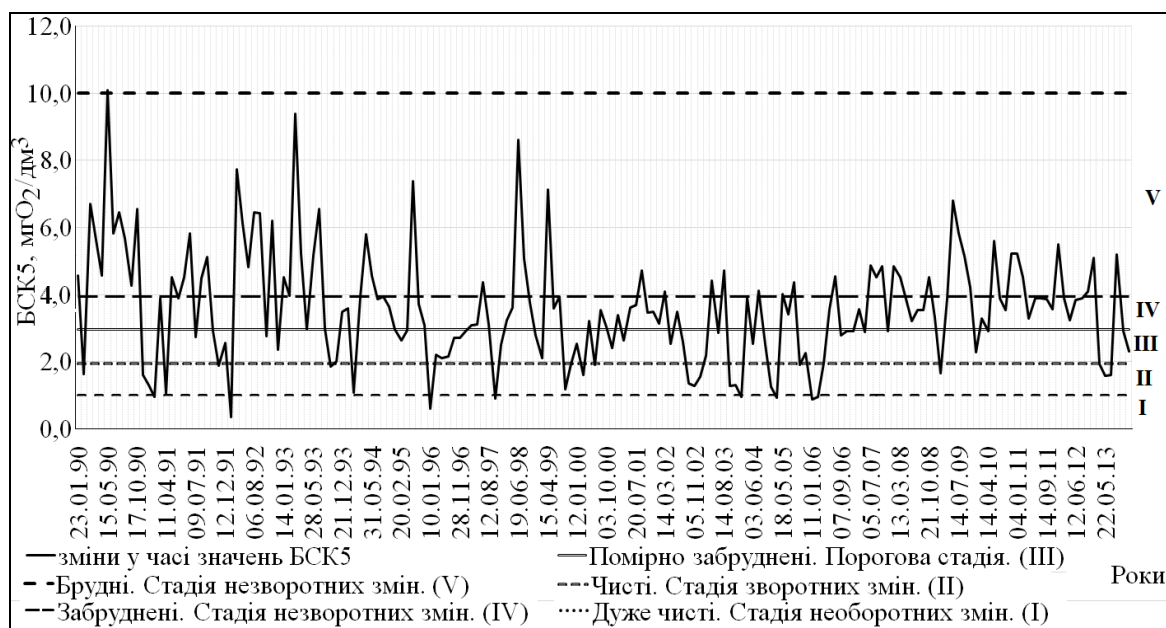


Рис. 8 – Мінливість значень показника *BCK5* по датах відбору проб у пункті спостережень р. Кривий Торець – м. Дружківка

Fig.8 – Variability of *BOD5* values by sampling dates in the observation point Kryvyi Torets River – town Druzhkivka

нення залишається високим (клас «брудні»). Зростання органічних речовин у воді річки пов'язане із несанкціонованими скидами вод харчової та хімічної промисловості.

4. ВИСНОВКИ

1. Установлено, що значення *BCK5* в басейні річки Сіверський Донець характеризуються загальною тенденцією до зменшення, починаючи з

кінця 90-х років минулого сторіччя. Ця тенденція добре виражена на головній річці і у меншій мірі на притоках. Серед створів із великими значеннями *BCK5* на початку XXI сторіччя виділяються Лисичанськ (вище та нижче міста), а також р. Уди – м. Харків (9 км нижче міста) та річки Донбасу.

2. Визначення рівня забруднення за гідрохімічним показником *BCK5* показало, що скиди комунально-побутових вод міста Харків нижче

суттєво погіршують якість вод річки Уди і роблять неможливим приведення їх до “доброго” екологічного стану. Модернізація очисних споруд і доочищення скидних вод будуть сприяти досягненню цілей, поставлених Водною рамковою директивою ЄС.

3. Річка Кривий Торець належить до річок Донбасу. Скиди неочищених та недоочищених вод металургійних та коксохімічних заводів, шахт і поверхневий злив із сховищ відходів забезпечують зростання концентрацій азоту амонійного та нітритного. Оцінки якості води за показником БСК5 показали, що забруднення органічними речовинами зменшилося при порівнянні із даними 90-тих років, але з 2006 року води знов стали «забрудненими», а їх екологічний стан – «пороговим та незворотним». Основним заходом на шляху до досягнення доброго екологічного стану річки має бути зменшення скидів недостатньо очищених та неочищених вод у поверхневі водотоки.

4. Слід зазначити, що оцінки якості та екологічного стану вод за БСК5 лише частково устанавлюють ступінь забруднення річкових вод, враховуючи лише вплив легкорозчинних органічних речовин. З урахуванням забруднення важкими металами перспективи доведення річок басейну Сіверського Дінця до доброго екологічного стану будуть ще гіршими.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Директива 2000 / 60/ ЄС Європейського Парламенту і ради від 23 жовтня 2000 року про встановлення рамок діяльності Співтовариства у сфері водної політики. 2000. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/371-2015-p> (дата звернення : 18.10.2020).
- Шабанов В. В., Маркин В. Н. Методика еколого-водохозяйственной оценки водных объектов: монография. Москва: ФГБОУ ВПО РГАУ МСХА им. К. А. Тимирязева, 2014. 162 с.
- Романенко В. Д. Основы гидроэкологии: учебник для студентов высших учебных заведений. Киев: Генеза, 2004. 664 с.
- Хільчевський В. К., Осадчий В. І., Курило С. М. Основи гідрохімії: підручник. Київ: Ніка-Центр, 2012. 312 с.
- Вишневецький В. І. Річки і водойми України. Стан і використання. Київ: Віпол, 2000. 375 с.
- Стан басейну Сіверського Дінця та фактори впливу в умовах військових дій / Технічний звіт ОБСЄ. Україна, 2018. 88 с.
- Оцінка змін якості води по довжині річки Сіверський Донець на початку ХХІ сторіччя / Лобода Н. С., Смалій О. В., Катинська І. В. та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. №23. С. 54 - 68. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.06>
- Лобода Н. С., Смалій О. В. Роль приток Донбасу у формуванні якості поверхневих вод річки Сіверський Донець. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 24. С. 64 – 71 <https://doi.org/10.31481/uhmj.24.2019.06>
- Loboda N. S., Smalii O. V. The Role Water Content in the Forming of the Ecological Condition of the Rivers of Siverskyi Donets Basin. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*. 2020. № 24 (2). P. 83-93. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2020/v24i230205>.
- Лобода Н. С., Катинська І. В. Визначення антропогенних навантажень та екологічних ризиків в басейні р. Кривий Торець (за програмою підтримки ЄС Водної політики України). *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. № 25. С. 81 - 92. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.08>
- Кондрашенко С. Экологические проблемы в городе Харькове. Київ: Арістель, 2005. 340 с.
- Программа охраны окружающей природной среды г. Харькова на 2013-2017 гг. URL: http://www.gov.lica.com.ua/b_text.php?type=3&id=54433&base=27 (дата звернення : 10.10.2020).
- Земля тревоги нашей. По материалам Докладов о состоянии окружающей среды в Донецкой области в 2007-2008 годах / под ред. С. Третьякова, Г. Аверина. Донецк, 2009. 124 с.
- Река Кривой Торец. URL: <http://kievbook.pp.ua/donecka/konka/konka5.html> (дата звернення: 10.10.2020).

REFERENCES

- Dyrektyva 2000 / 60 / ES Yevropeiskoho Parlamentu i rady vid 23 zhovtnia 2000 roku pro vstanovlennia ramok diialnosti Spivtovarystva u sferi vodnoi polityky. [Directive 2000 / 60 / EU of the European Parliament and of the Council about establishing a scope of activities in the field of water policy from 23 October 2000 year]. Available at: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/371-2015-p> (Accessed: 18 October 2020) (in Ukr.)
- Shabanov, V.V. & Markyn, V.N. (2014). *Metodika ekologo-vodokhozyaystvennoy otsenki vodnykh ob'ektov. [Methodology for the environmental and water management assessment of water bodies]*. Moskva: Timiryazev, K.A FGBOU VPO RGAU MSHA. (in Rus.)
- Romanenko, V.D. (2004). *Osnovy gidroekologii [Basics of hydroecology]*. Kyev: Geneza. (in Russ.)
- Khilchevskiy, V.K., Osadchii, V.I. & Kurylo, S.M. (2012). *Osnovy hidrokhimii. [Fundamentals of Hydrochemistry]*. Edited by Khilchevskiy, V.K. Kyiv: «Nika-Centr». (in Ukr.)
- Vyshnevskiy, V.I. (2000). *Richky i vodoimy Ukrainy. Stan i vykorystannia [Rivers and reservoirs of Ukraine. Condition and use]*. Kyiv: Vipol. (in Ukr.)
- Technical Report OSCE. (2018). *Stan baseinu Siverskoho Dintsia ta faktory vplyvu v umovakh viiskovykh dii. [The state of the Siverskyi Donets Basin and factors of influence in the conditions of hostilities]*. Ukraine. (in Ukr.)
- Loboda, N.S., Smalii, O.V., Katynska, I.V. et al. (2019). [Assessment of changes in the water quality along the length of the Siverskyi Donets River at the beginning of the 21st century]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 23, pp. 54 - 68. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.06> (in Ukr.)
- Loboda, N.S. & Smalii, O.V. (2019). [The role of Donbas tributaries in the formation of surface water quality of the Siverskyi Donets River]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 24, pp. 64 - 71. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2020/v24i230205> (in Ukr.)
- Loboda, N.S. & Smalii, O.V. (2020) The Role Water Content in the Forming of the Ecological Condition of the Rivers of Siverskyi Donets Basin. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, № 24 (2),

- pp. 83 - 93. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2020/v24i230205>.
10. Loboda, N.S. & Katynska, I.V. (2020). [Determination of main anthropogenic impacts and of environmental risks in the Kryvyi Torets river basin (With EU Support Program for a ukrainian water policy)]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 25, pp. 81 - 92. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.08> (in Ukr.)
 11. Kondrashenko, S. (2005). *Ekologicheskie problemy v gorode Khar'kove [Environmental problems in Kharkov City]*. Kyiv: Aristel. (in Russ.)
 12. *Programma okhrany okruzhayushchey prirodnoy sredy g. Khar'kova na 2013-2017 gg. [Environmental protection program of Kharkiv for 2013-2017]*. Available at: http://www.gov.lica.com.ua/b_text.php?type=3&id=54433&base=27 (Accessed: 10 October 2020) (in Russ.)
 13. Tret'yakov, S & Averin, G. (eds). (2009). *Zemlya trevogi nashey. Po materialam Dokladov o sostoyanii okruzhayushchey sredy v Doneckoy oblasti v 2007-2008 godakh. [The land of our anxiety. According to the Reports on the state of the environment in the Donetsk region in 2007-2008]*. Donetsk. (in Russ.)
 14. *Reka Krivoy Torets [Kryvyi Torets River]*. Available at: <http://kievbook.pp.ua/donecka/konka/konka5.html> (Accessed: 10 October 2020) (in Russ.)

ASSESSMENT OF THE WATER POLLUTION LEVEL AND THE ENVIRONMENTAL STATUS OF RIVERS IN THE SIVERSKYI DONETS BASIN BY BOD5

Loboda N.S., Katynska I.V., Smalii O.V.

Odessa State Environmental University, 15, Lvivska Str., 65016, Odesa, Ukraine,
natalie.loboda@gmail.com, irinakatinskaya@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>, <https://orcid.org/0000-0001-9152-0471>

The paper topicality consists in the necessity for determination of the environmental status of the rivers in the Siverskyi Donets Basin and assessment of the possibilities for them to achieve 'good environmental status' under the modern climatic conditions and the anthropogenic load. Siverskyi Donets is the main river in the Eastern Ukraine. There are large industrial zones at the water catchment area. Among them, there are the Donetsk Coal Basin and the industrial complexes within the City of Kharkiv, which have exerted influence on surface water quality for decades. A method for assessment of the pollution level and the environmental status of waters by the hydrochemical index of *BOD5* (biochemical oxygen demand for 5 days) is used in the paper.

The paper is aimed at identification of the main trends in water quality changes by hydrochemical index of *BOD5*. *The object of research* is a pollution of the rivers at the Siverskyi Donets Basin by industrial, municipal and mine wastewaters. *The subject of research* is an assessment of water qualitative status by *BOD5*.

The hydrochemical observation data for 7 gauges at the main river and 7 tributaries for the period of 1990-2015 were used in the paper. The major attention is focused on the most polluted rivers in the Eastern Ukraine: the Udy and the Kryvyi Torets. The quality of the Udy River water is largely determined by the municipal wastewater from Kharkiv. The Kryvyi Torets River belongs to the Donbas rivers, where pollution by mine water and wastewater from industrial enterprises is significant.

Pollution levels, environmental status and saprobity were determined by the average annual indices of *BOD5*. Empirical probabilities for occurrence of a certain pollution parameter at various gauges were calculated for comparative analysis.

It is found that a *BOD5* downward trend has been prevalent on the rivers at the Siverskyi Donets catchment area in the early 21st century. The highest *BOD5* values were observed on the Donbas tributaries and the Udy River (downstream from the City of Kharkiv), as well as upstream and downstream from Lysychansk, and the lowest ones were observed on the Oskil River.

It is also revealed that in the early 21st century, the main river water has a 'threshold' environmental status (β -mesosaprobic zone), except for the Lysychansk gauge, where the status is 'irreversibly altered' owing to the inflow of polluted water from Donbas rivers into the Siverskyi Donets.

Research into the Udy River water quality upstream and downstream from the industrial city of Kharkiv has shown that the water in the upper reaches of this river is classified as 'clean' and 'moderately polluted', and the environmental status may become 'good' in the future. Downstream from the city, the water is mostly 'dirty', and the environmental status is 'irreversibly altered', which corresponds to the α -mesosaprobic zone. For the Kryvyi Torets River (the Donbas Region), owing to the impact of organic pollution, the environmental status is defined as 'threshold', 'irreversibly altered' and it has begun to deteriorate in recent years.

To improve the environmental status of the Donbas rivers, the reduction in discharges of untreated municipal and industrial wastewater into surface watercourses, as well as the

construction of state-of-the-art sewage treatment plants are necessary.

Keywords: the Siverskyi Donets River, biochemical oxygen demand, the level of organic pollution, environmental status, saprobity zone.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОД РЕК БАСЕЙНА СЕВЕРСКОГО ДОНЦА ПО ПОКАЗАТЕЛЮ БСК5

Н. С. Лобода, И. В. Катинская, О. В. Смалый

Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина,
natalie.loboda@gmail.com, irinakatinskaya@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>, <https://orcid.org/0000-0001-9152-0471>

Актуальность работы заключается в необходимости определения экологического статуса рек бассейна Северского Донца и оценке возможностей достижения "хорошего экологического состояния" в современных климатических условиях и антропогенной нагрузке. Северский Донец является главной рекой восточной Украины. На территории водосбора расположены крупные промышленные зоны, среди которых находится Донецкий каменноугольный бассейн и промышленные комплексы города Харьков, которые десятилетиями оказывали влияние на качество поверхностных вод. В представленной работе использована методика оценки уровня загрязнения вод и их экологического состояния по гидрохимическому показателю БПК5 (биологическое потребление кислорода в течение 5 дней).

Целью работы является выявление основных тенденций изменений качества воды по гидрохимическому показателю БПК5. Объектом исследования является загрязнение вод рек бассейна Северского Донца промышленными, коммунально-бытовыми, шахтными водами. Предметом исследования является оценка качественного состояния вод по БПК5.

В работе использованы данные гидрохимических наблюдений на 7 створах главной реки и 7 притоках за период 1990-2015 гг. Основное внимание уделено наиболее загрязненным рекам востока Украины: Уды и Кривой Торец. Качество воды реки Уды в значительной мере определяется коммунально-бытовыми сточными водами города Харькова. Река Кривой Торец относится к рекам Донбасса, где значительны загрязнения шахтными водами и водами промышленных предприятий.

По средним годовым показателям БПК5 определены уровни загрязнения, экологическое состояние и сапробность. Для сравнительного анализа были рассчитаны эмпирические вероятности появления той или иной характеристики загрязнения в разных створах.

Установлено, что на реках водосбора Северского Донца преобладает тенденция к уменьшению БПК5 в начале XXI века. Наибольшие показатели БПК5 наблюдались на притоках Донбасса и реке Уды (ниже города Харькова), а также выше и ниже города Лисичанска, наименьшие – на реке Оскол.

Выявлено, что в начале XXI века воды главной реки находятся в «пороговой» стадии (β-мезосапробная зона), исключая створ Лисичанска, где экологическое состояние является стадией «необратимых изменений» из-за поступления в Северский Донец загрязненных вод Донбасса.

Исследование качества вод реки Уды выше и ниже промышленного города Харькова показали, что в верхнем течении этой реки воды классифицируются как «чистые» и «умеренно загрязненные», а экологическое состояние может в будущем получить статус «хорошего». Ниже города воды преимущественно грязные, а экологическое состояние является стадией «необратимых изменений», α-мезосапробная зона. Для реки Кривой Торец (Донбасс) из-за влияния органического загрязнения экологическое состояние определенное как «пороговая» стадия и стадия «необратимых изменений», в последние годы стало ухудшаться.

Для улучшения экологического состояния рек Донбасса необходимо уменьшение сбросов в поверхностные водотоки неочищенных коммунально-бытовых и промышленных вод, а также строительство очистных сооружений современного уровня.

Ключевые слова: река Северский Донец, биохимическое потребление кислорода, уровень загрязнения органическими веществами, экологическое состояние, зона сапробности.

Подання до редакції : 29. 11. 2020

Надходження остаточної версії : 09. 12. 2020

Публікація статті : 17. 12. 2020

УДК 556.16

ДОСЛІДЖЕННЯ ОКРЕМИХ СКЛАДОВИХ ГІДРОЛОГІЧНОГО ТА ГІДРОХІМІЧНОГО РЕЖИМІВ РІЧКИ ДУНАЙ НА УКРАЇНСЬКІЙ ДІЛЯНЦІ РЕНІ-ІЗМАЇЛ

Ж. Р. Шакірманова¹, Н. С. Кічук¹, Є. О. Романова¹, І. Д. Кічук¹, Ю. С. Медведєва²

¹Одеський державний екологічний університет
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, jannetodessa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5657>
²Національний університет «Одеська морська академія»
вул. Дідріхсона, 8, Одеса 65029, Одеса, Україна

Дане дослідження направлене на вивчення окремих складових гідрологічного та гідрохімічного режимів річки Дунай (в межах України) у зв'язку з широким використанням її вод для водопостачання і зрошення у південному регіоні країни, а також для більш ефективного регулювання водно-сольового режиму Придунайських озер, для яких прісна вода р. Дунай є основним джерелом їх водооновлення. Важливим питанням є дослідження режиму наносів р. Дунай, що приносяться в дельту у зв'язку з їх впливом на формування самої дельти в гирлі річки, а також впливом на замулення дельтових і придельтових озер та каналів, які з'єднують озера з Дунаєм.

Мета роботи полягає в дослідженні багаторічних і сучасних тенденцій в змінах гідрологічного (рівнів та витрат води, стоку зважених наносів) та гідрохімічного (мінералізації води) режимів р. Дунай на українській ділянці від гідроствору м. Рені до м. Ізмаїл, внутрішньорічного розподілу стоку води, а також стоку наносів та мінералізації вод в різні за водністю роки.

В результаті статистичного аналізу багаторічних рядів спостережень на р. Дунай на ділянці м. Рені-м. Ізмаїл одержано, що часові тенденції середніх, максимальних і мінімальних рівнів (1921-2015 рр.) та витрат (1840-2015 рр.) води вказують на наявність слабо вираженого їх зростання протягом тривалого часу, з більш вираженим підвищенням максимальних рівнів чи витрат води. Внутрішньорічний хід показує загальну синхронність коливань характеристик стоку, а більш вираженими сезонними коливаннями відрізняються максимальні місячні величини витрат води.

Виявлено наявність вираженого тренду до зменшення стоку зважених наносів на р. Дунай – м. Рені (за період 1840-2015 рр.), з найбільш інтенсивним їх зниженням у період 1990-2015 рр. Внутрішньорічний розподіл середньомісячних витрат зважених наносів р. Дунай для характерних за водністю років (за період 1978-2015 рр.) показав, що вони мають сезонні коливання. При цьому спостерігається зменшення витрат наносів по довжині річки – від м. Рені до м. Ізмаїл.

У багаторічному ході середніх річних величин мінералізації р. Дунай -- м. Ізмаїл (1981-2015 рр.) має місце їх зменшення на фоні незначного підвищення середніх річних витрат води. У внутрішньорічному розподілі значень мінералізації води у всі групи водності років виділяються періоди, які пов'язані з фазами водного режиму річки протягом року та господарським використанням вод.

Таким чином, підвищення у багаторічному періоді стоку води р. Дунай на ділянці м. Рені -- м. Ізмаїл сприятиме розвитку господарства і водопостачання регіону, зрошуваного землеробства, регулюванню наповнення Придунайських озер слабо мінералізованими річними водами. При цьому зменшення стоку зважених наносів буде стримувати замулення підвідних каналів, що з'єднують озера з р. Дунай, що забезпечить покращення водообміну озер з прісними водами річки.

Ключові слова: водний режим р. Дунай; режим наносів; мінералізація води; багаторічні тенденції; внутрішньорічний розподіл

1. ВСТУП

Найбільша річка Європи Дунай (довжина 2857 км, площа басейну 817 тис.км² [1-3]) в межах України має басейн розташований лише на

ділянці нижньої течії – дельти і гирла. Відстань по Дунаю на відміну від інших річок світу, вказується проти течії річки – від гирла («0» км). Знак «0 км» знаходиться на Делюковій косі (не-

великому острові Анкудінов), де він позначений великим нулем, при впадінні Дунаю в Чорне море. Довжина річки від гирла до м. Рені становить порядку 170 км.

В гирловій частині річка має дельту площею, що становить близько 4200 км² (причому українська її частина займає 830 км²), протяжність морського краю дельти – 190 км. Державний кордон між Україною та Румунією проходить по фарватеру на придельтовій ділянці Дунаю, а в межах дельти – по Кілійському рукаву (від місця розділення Дунаю на Кілійський (лівий) і Тульчинський (правий) рукави) і його гирлам [3-5]. Через Сулінський рукав дельти (Румунія) проходить міжнародний водний шлях, що з'єднує Дунай з Чорним морем. На придельтовій ділянці і в самій дельті (в межах України) знаходяться міста Рені, Ізмаїл, Кілія, Вилкове, а в межах Румунії – Ісакча, Тульча, Суліна.

Водні ресурси гирлової області Дунаю (в межах України) є основним джерелом для розвитку зрошувального землеробства та рибного господарства, водопостачання населених пунктів і підприємств в посушливому регіоні Півдня України [2].

Річковий стік Дунаю і мінералізація його вод є також основною складовою в водному і сольовому режимах Придунайських озер, для яких води р. Дунай є основним джерелом їх водооновлення за рахунок надходження прісних вод.

Дослідження режиму наносів р. Дунай, що приносяться в дельту є важливим питанням у зв'язку з їх впливом на формування самої дельти в гирлі річки, а також впливом на замулення дельтових і придельтових озер та каналів, які з'єднують озера з Дунаєм [4, 5].

Отже вивчення тенденцій в багаторічному гідрологічному та гідрохімічному режимах річки Дунай на українській ділянці (нижче м. Рені) має науковий інтерес і практичну важливість.

Мета роботи полягає в дослідженні багаторічних і сучасних тенденцій в змінах гідрологічного (рівнів та витрат води, стоку зважених наносів) та гідрохімічного (мінералізації води) режимів р. Дунай на українській ділянці від гирла до м. Рені до м. Ізмаїл, внутрішньорічного розподілу стоку води, а також стоку наносів та мінералізації вод в різні за водністю роки.

Результати, отримані в даному дослідженні можуть використовуватися при обґрунтуванні ефективності регулювання режимом української частини р. Дунай з метою водопостачання і зрошення, що сприятиме соціально-економічному розвитку всього Придунайського регіону в цілому.

2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Гідрологічний і гідрохімічний режими гирлової області Дунаю (в межах України), як й інших річок знаходяться під впливом як природних, так і антропогенних чинників, пов'язаних з використанням водних ресурсів (водопостачання, водні меліорації, рибне господарство) та регулюванням стоку гідротехнічними спорудами, а також кліматичними змінами, що викликані підвищенням температури повітря, просторовими і тимчасовими змінами режимів опадів і випаровування [5].

Величина середнього багаторічного стоку в гирлі р. Дунай, що вказана в літературних джерелах різних років [4-8] коливається в межах від 183 до 291 км³/рік. Як відомо [5], існує декілька причин, пов'язаних з тим, що існують протиріччя стосовно оцінки стоку Дунаю – це різна довжина рядів для розрахунків річного стоку, різні та не визначені місця вимірів витрат води та різні методи вимірів та розрахунків стоку річки. На основі досліджень багаторічних коливань річного стоку р. Дунай в роботах [5-7] стік річки прийнятим близьким 200 км³/рік, але за різні періоди осереднення. В [9] річний об'єм стоку р. Дунай у створі Ізмаїльський Чатал, визначений за період 1931-2005 рр. і становить 202 км³/рік.

Дослідженням водного режиму міжнародної річки Дунай присвячені чисельні дослідження авторів [10-16], що узагальнені в [17]. Потепління клімату є домінуючим фактором змін водних ресурсів і режимів стоку води в басейні річки Дунай [18-20]. Так, при збільшенні середньорічної температури повітря, відбувається зменшення частки снігу в осінні і зимові місяці року, що призводить до загальних тенденцій до зменшення річкового стоку навесні та збільшення його в осінньо-зимовий період. При цьому збільшується амплітуда між найбільшими і найменшими витратами води, а також відбувається зміщення пікових значень талодощового стоку до початку календарного року [21]. Антропогенний вплив на середній стік води оцінений в роботі [5] як не значний та складає не більше 8 % безповоротних втрат води. При аналізі формування гідрологічного режиму в гирлі Дунаю авторами [22] здійснено оцінку як природних, так і антропогенних змін стоку води.

Режим та умови формування стоку зважених наносів української дельти Дунаю розглянуті в роботах дослідників різних років В. Н. Михайлова [5], Є. А. Левашової та ін. [8], Ю. Д. Шуйського [23], О. І. Чероя [24]. В роботах розглянуті питання оцінки середньобагаторічних величин стоку наносів

Дунаю [5, 8], балансу наносів у формуванні Кілійської дельти [8], перерозподілу стоку води та наносів в рукавах дельти в умовах антропогенних та природних перетворень [5, 23, 24].

Середні багаторічні величини стоку зважених наносів Дунаю коливаються, як і для стоку води, в широких межах – від 42 до 84 млн. т/рік [5]. Однак будівництво гребель, забір дунайської води для потреб побутових, сільськогосподарських, промислових та ін. потреб призвели до зменшення скидів річкових наносів.

В зарубіжній літературі дослідженням режиму стоку наносів р. Дунай присвячені роботи авторів Придунайських країн [25-28]. В них досліджуються багаторічні процеси формування, міграції наносів, режими відкладень як у просторі, так і в часі на основі використання сучасних методів вимірювання швидкості течії і зважених наносів, транспортування зваженого осаду річками і струмками, що стікають в озера та ін.

Дослідженням мінералізації та гідрохімічного режиму вод річок, у тому числі й р. Дунай (українська частина), що залежать від впливу природних і антропогенних чинників, присвячені роботи авторів [29, 30]. Роль антропогенних чинників зростає по мірі розвитку господарського освоєння території та використання вод [31].

Природні чинники визначають географічну зональність в хімічному складі вод. Вплив місцевих азональних чинників, до яких можна віднести геологічну будову, генезис, морфологію, температурний режим визначають сольовий склад та гідрохімічний режим річки [30].

Таким чином, на основі аналізу виконаних досліджень постає завдання вивчення гідрологічного і гідрохімічного режимів української ділянки р. Дунай при подовженні часових рядів спостережень, змін кліматичних умов формування та антропогенних впливів на окремі складові режимів річки.

3. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є окремі складові гідрологічного режиму рівнів та витрат води, стоку наносів, гідрохімічного режиму на ділянці р. Дунай від гідроствору м. Рені (54 миля) до м. Ізмаїл (115 км). Ця ділянка розташована нижче від гирла р. Прут (м. Рені) до місця дещо нижче роз'єднання Дунаю на Кілійський і Тульчинський рукави (м. Ізмаїл) і має довжину 21 км.

Вихідні матеріали. При аналізі окремих складових гідрологічного режиму ділянки Дунаю від м. Рені до м. Ізмаїл як вихідні дані по стоку води використані матеріали Державного водного ка-

дастру України [32], монографічні і довідкові видання [1, 5, 17, 33-37], спостереження Дунайської гідрометеорологічної обсерваторії (ДГМО, м. Ізмаїл). В даний час стандартна мережа гідрологічних спостережень на українській пригірловій частині р. Дунай складається з 6 річкових постів, з яких два вимірюють витрати води – р. Дунай – м. Рені, г/с 54 миля (період дії з 1959 р.) і р. Дунай, Кілійське гирло – м. Ізмаїл, г/с 115 км (діє з 1928 р.). Дані про рівні води на постах м. Рені і м. Ізмаїл відносяться до 1921 р.

Авторами монографії [5] стокові ряди були подовжені шляхом складення унікального за тривалістю зведеного ряду спостережень 1840-2002 рр. (163 роки) за стоком води Дунаю у вершині дельти (г/с 54 миля). З цією метою середньомісячні та середньорічні витрати води за період з 1840 по 1920 рр. були розраховані авторами [5] за прив'язкою до рівнів води на румунському г/п Тульча (за даними доктора К. Бондара, Румунія [6]). За допомогою багаторічної кривої витрат води в ДГМО авторами [5] проведені розрахунки щоденного стоку у м. Рені за період, починаючи з 1921 р. У 2000 році координати багаторічної кривої були уточнені у зв'язку з будівництвом захисної дамби уздовж правого берега Дунаю (в 1987-1991 рр.). При цьому відбувалося підвищення рівнів води під час весняних водопіль та розмив русла річки, що призвело до зниження рівнів води під час низької водності при однакових витратах води у вершині дельти Дунаю [5]. Дані по стоку зважених наносів для поста м. Рені були відновлені авторами [5] аналогічно стоку води з 1840 р.

Таким чином, до статистичного аналізу авторами даної роботи був прийнятий часовий ряд спостережень за витратами води на р. Дунай – м. Рені (г/с 54 миля) та р. Дунай – м. Ізмаїл (г/с 115 км) тривалістю з 1840 по 2015 рр. (для середньорічних) і за період з 1921-2015 рр. (для максимальних та мінімальних) річних витрат води. Дані по витратах води на гідрологічному посту Ізмаїл (115 км) за попередні роки надані Дунайською ГМО. Стік зважених наносів досліджений за період 1840-2015 рр. на посту м. Рені і з 1978-2015 рр. – м. Ізмаїл.

Слід зазначити, що в режимних виданнях України [32] дані про рівні води з 1945 р. по посту Рені і з 1921 р. – по м. Ізмаїл. Середні і характерні витрати води за багаторічний період, а також витрати зважених наносів наводяться за період 1978-2015 рр.

Для характеристики режиму мінералізації р. Дунай використані матеріали по середнім річнім їх величинам за період 1981-2015 рр. в ство-

рах м. Рені та м. Ізмаїл.

Методика дослідження полягає в аналізі багаторічних рядів спостережень та встановлення тенденцій змін гідрологічних і гідрохімічних характеристик у багаторічному періоді, внутрішньорічного їх розподілу за роками водності р. Дунай (на ділянці м. Рені та м. Ізмаїл) [38].

4. ОПИС І АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Гідрологічний режим рівнів води

На рівневий режим дельти Дунаю визначальний вплив має внутрішньорічна мінливість стоку води, згінні та нагінні явища гирлового узмор'я, льодові утворення, будівництво гідротехнічних споруд (гребель обвалування, дамб та ін.).

У річному ході рівнів води в гирловій ділянці Дунаю виявляються такі сезонні коливання, як весняно-літнє водопілля, літньо-осіння межень, осінні паводки, зимова межень та зимові паводки [3-5]. У зимовий період режим рівнів води характеризується нестійкістю і в значній мірі визначається погодними умовами на водозборі. Сталі низькі рівні води спостерігаються у морозні зими, зазвичай у січні-лютому. В теплі зими, коли льодові явища відсутні відбувається формування декількох паводкових хвиль.

Суттєвий вплив на рівневий режим дельти Дунаю мають явища згінних та нагінних коливань, які з'являються у Приморській частині дельти і розповсюджуються (особливо при сильних вітрах, швидкістю понад 10 м/с) вгору за течією води в річці (або дельтових рукавах). Згони обумовлюються вітрами західних напрямів, а нагони – східних [5].

Характерною особливістю льодового режиму Дунаю є крайня нестійкість льодових фаз [3-5]. Льодостав спостерігається не кожного року.

На нижньому Дунаї ймовірність льодоставу становить 40-75 %. Повторні замерзання і розкриття тут рідкісні.

Дослідження статистичних характеристик льодових явищ в дельті Дунаю пов'язані в науковій літературі з встановленням емпіричної ймовірності дат появи льодових явищ та дат утворення льодоставу [5, 39], побудовою емпіричних кривих забезпеченості цих дат та повторюваності випадків наявності льодових явищ та льодоставу [39]. В роботі [40] авторами Л. О. Горбачовою і Б. Ф. Христюк встановлено, що в цілому існує однорідність в рядах дат появи льодових явищ, їхньої тривалості, та дат очищення від льоду, а також багаторічна циклічність в коливаннях цих дат з поступовим зменшенням з 70-х років минулого сторіччя тривалості періоду з льодовими явищами.

Характерні за багаторічний період рівні води (середній, вищий і нижчий за рік) наведені у табл. 1 (для річок з нестійким льодоставом) [32]. Так, у м. Рені (за період 1945-2015 рр.) середній максимальний рівень води становить 438 см (4,74 м БС-77). Найбільший максимум досягав 581 см (6,17 м БС-77) у 2010 р., а найменший рівень води - до мінус 40 см (мінус 0,17 м БС) у 1953 р. Середні коливання рівнів води за рік становлять 3,91 м, при найбільших – 5,34 м (у 1985 р.). Середній за багаторічний період 1945-2015 рр. рівень води посту м. Рені дорівнює 233 см (2,62 м БС до 1976 і БС-77), причому за період 1921-2015 рр. рівень води майже не змінився (2,60 м БС до 1976 і БС-77).

Максимальний багаторічний рівень води у вершині Килійського рукава (у м. Ізмаїл) за період 1921-2015 рр. становить 303 см (2,85 м БС-77), найвищий – 420 см (3,97 м БС)

Таблиця 1 – Характерні рівні води р. Дунай
Table 1 - Characteristic water levels of the Danube River

Характеристика	Середній рівень за рік	Вищий рівень за рік, см		Нижчий рівень за рік, см		Колівання рівня за рік, см	
		середній	вищий	середній	нижчий	середній	Найбільший
р. Дунай – м. Рені (відмітка нуля поста 0,23 м БС до 1976 р.; відмітка нуля поста 0,36 м БС-77) 1945–2015 рр. [32] (1921-2015 рр.)							
рівень води	233 (232)	438	581	44	-40 (-66)	391	534
дата	-	12.04	06.07.2010	17.10	29.12.1953 (28.10.1921)		1985
р. Дунай, Кілійське гирло – м. Ізмаїл (відмітка нуля поста -0,23 м БС до 1976 р.; відмітка нуля поста -0,18 м БС-77) 1921–2015 рр. [32]							
рівень води	167	303	420	39	-30	265	369
дата	-	22.04	22.05.1970	01.11	30.10, 01.11.1921		1942

у 1970 р. (близький до забезпеченості водності року $P=1\%$), а найнижчий – мінус 30 см (мінус 0,53 м БС) у 1921 р. (близький до $P=90\%$). Річна амплітуда коливань рівнів води при цьому становить 2,65 м, а найбільша – 3,69 м (1942 р.). Середній за багаторічний період рівень води посту м. Ізмаїл становить 167 см (1,47 м БС до 1976 і БС-77) (1921-2015 рр.).

Часові тенденції середніх, максимальних і мінімальних рівнів води (за період 1921-2015 рр.) показують наявність слабо вираженого зростання рівнів води протягом тривалого часу, що більш відчутно для максимальних їх величин (рис.1).

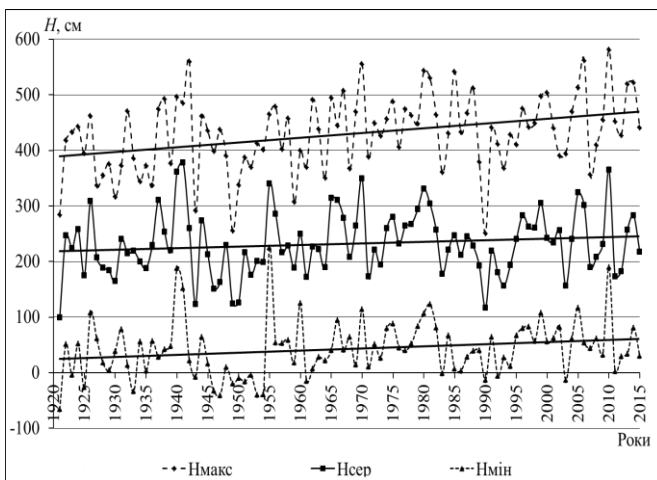


Рис. 1 – Хронологічні графіки середніх (1840-2015 рр.), максимальних і мінімальних (1921-2015 рр.) рівнів води р. Дунай – м. Рені, см

Fig. 1 -- Chronological graphs of average (1840-2015), maximum and minimum (1921-2015) water levels of the Danube River at Reni, cm

Внутрішньорічний хід середніх, максимальних і мінімальних місячних рівнів води р. Дунай у м. Рені і м. Ізмаїл показує загальну синхронність їх коливань при найвищих місячних рівнях у квітні і травні (в багатоводні роки високі рівні відзначалися майже протягом п'яти місяців), а найменші місячні рівні води практично завжди припадають на початок осені (рис. 2).

4.2 Гідрологічний режим витрат води

Основна частина водного стоку Дунаю формується в верхній і особливо середній течії річки, де Дунай перетинає Південні Карпати. На Нижньому Дунаї і в дельті річки для режиму стоку води характерні добре виражене тривале

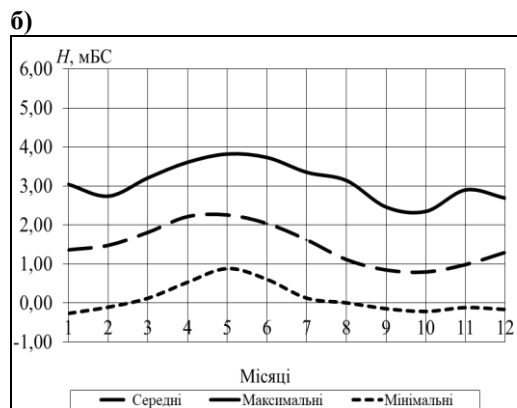
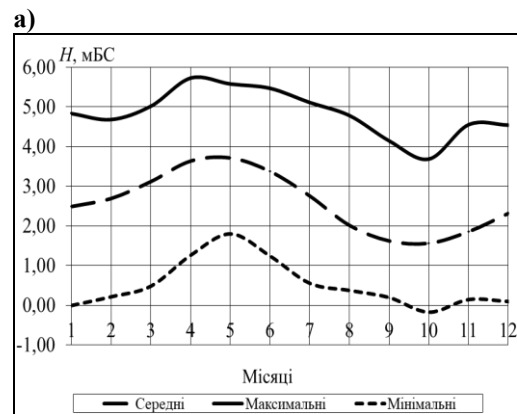


Рис. 2 – Внутрішньорічний хід середніх, максимальних і мінімальних місячних рівнів води р. Дунай у м. Рені (а) та у м. Ізмаїл (б) (за період 1921-2015 рр.)

Fig. 2 - Annual distribution of average, maximum and minimum monthly water levels of the Danube River at Reni (a) and Izmail (b) (for the period 1921-2015)

за часом і високе весняно-літнє водопілля, сформоване талими сніговими і дощовими водами, і літнє-осіння межінь. Весняно-літнє водопілля складається з декількох повеневих хвиль, які формуються на Середньому та Нижньому Дунаї і звичайно відмічається в березні – липні, часто на нього припадає річний максимум стоку. Найменші витрати води спостерігаються в літню-осінню межінь в період з серпня по жовтень. У сучасних умовах на частку весняного водопілля припадає 50,7-60 % річного стоку води [5, 32].

За даними режимних видань України, тобто для періоду осереднення 1978-2015 рр. [32] середні річні витрати води спостерігалися рівними $6660 \text{ м}^3/\text{с}$ (м. Рені, гідроствор 54 миля) і $3730 \text{ м}^3/\text{с}$ (м. Ізмаїл, гідроствор 115 км), при об'ємах стоку за рік 210 млн. м^3 та 118 млн. м^3 , відповідно (табл. 2). При цьому за зведеним часовим рядом середні річні витрати води за період 1840-2015 рр. становлять в створах м. Рені – $6355 \text{ м}^3/\text{с}$ і м. Ізмаїл – $3695 \text{ м}^3/\text{с}$, що на 4,6 і 1,0 %

нижче від значень річних витрат води періоду осереднення 1978-2015 рр., відповідно.

За період 1840-2015 рр. найбільші середні річні витрати води відзначалися: в 1940 р. – 9520 м³/с і 5570 м³/с, в 1941 р. – 9950 м³/с і 5820 м³/с, в 1970 р. – 9620 м³/с і 5540 м³/с, у 2010 р. – 9470 м³/с і 5070 м³/с, а найменші: в 1863 р. – 3610 м³/с і 2110 м³/с, в 1921 р. – 3910 м³/с і 2290 м³/с та в 1990 р. – 4190 м³/с і 2550 м³/с, відповідно в м. Рені і м. Ізмаїл.

Найбільші витрати води (отримані по строкових спостереженнях за рівнем води), зазвичай в період весняно-літнього водопілля, в середньому за період 1978-2015 рр. становлять 11800 м³/с (м. Рені) і 6440 м³/с (м. Ізмаїл), з абсолютним максимумом у липні 2010 р. – 15500 м³/с і 8960 м³/с, відповідно (табл. 2). Такі величини за період зведеного ряду (1921-2015 рр.) на 4,5 і 3,1 %, відповідно, є нижчими за дані режимного видання [32].

За період 1921-2015 рр. найбільші річні витрати води коливалися в залежності від водності року від 6670 м³/с до 16000 м³/с (м. Рені) і 3740 м³/с до 8960 м³/с (м. Ізмаїл). Найбільш високі водопілля відмічені у 1942 р. (15300 м³/с і 8490 м³/с), 1970 (16000 м³/с і 8380 м³/с), 1980 (15500 м³/с і 8160 м³/с), 1981 (15000 м³/с і 7930 м³/с), 1988 (14400 м³/с і 7620 м³/с), 2006 (14900 м³/с і 8410 м³/с), а також у 2010 р.

Літньо-осінній мінімум є найнижчим протя-

гом року. В режимному виданні [32] найменші зимові витрати води (отримані по строкових спостереженнях за рівнем води) вибрано за період від початку появи більш-менш стійких льодових явищ восени попереднього року до початку весняної повені в поточному році. В середньому за період 1978-2015 рр. їх величини становили 3120 м³/с (м. Рені) і 1830 м³/с (м. Ізмаїл), з абсолютним мінімумом 2000 м³/с (13.09.1990) і 1100 м³/с (05-11.09.2003), відповідно (табл. 2). Так само ж оцінені величини найменших річних витрат води за період зведеного ряду (1921-2015 рр.), які на 6,2 і 1,1 %, відповідно також є нижчими за осереднені величини найменших витрат води періоду 1978-2015 рр. За період 1921-2015 рр. найменші витрати води коливалися від 1280 м³/с до 6140 м³/с (м. Рені) і 1030 м³/с до 3460 м³/с (м. Ізмаїл).

В результаті аналізу багаторічних характеристик виконаний аналіз зведеного багаторічного ряду середніх річних (за період 1840-2015 рр., тривалістю 176 років) та максимальних і мінімальних (1921-2015 рр., періодом 95 років) витрат води р. Дунай – м. Рені. Він показав наявність слабо вираженого майже вікового тренду до підвищення максимальних витрат води та не значного підвищення середніх і мінімальних витрат води (рис. 3). Аналогічні тенденції відмічаються й для рівнів води.

Таблиця 2 - Середні і характерні витрати води р. Дунай (період 1978-2015 рр.) [32]
Table 2 - Average and characteristic discharges of the Danube River (period 1978-2015) [32]

Статистична величина	Середня річна витрата води, м ³ /с	Середній річний модуль стоку, л/с км ²	Шар стоку за рік, мм	Об'єм стоку за рік, км ³	Характерні витрати води			
					найбільша		найменша	
					м ³ /с	дата	м ³ /с	дата
р. Дунай – м. Рені (гідроствор 54 миля). Площа водозбору 811 000 км ²								
Середня	6660	8,21	259	210	11800	-	3120	-
Найбільша	9470	11,7	369	299	15500	06.07.2010	5470	12.11.2010
Найменша	4190	5,17	163	132	6670	25.12.1990	2000	13.09.1990
р. Дунай, Кілійське гирло – м. Ізмаїл (гідроствор 115 км). Площа водозбору 813 000 км ²								
Середня	3730	4,59	145	118	6440	-	1830	-
Найбільша	5070	6,24	197	160	8960	07.07.2010	2870	13.11.2010
Найменша	2550	3,14	99	80,4	3920	26.12.1990	1100	05-11.09.2003 (6)

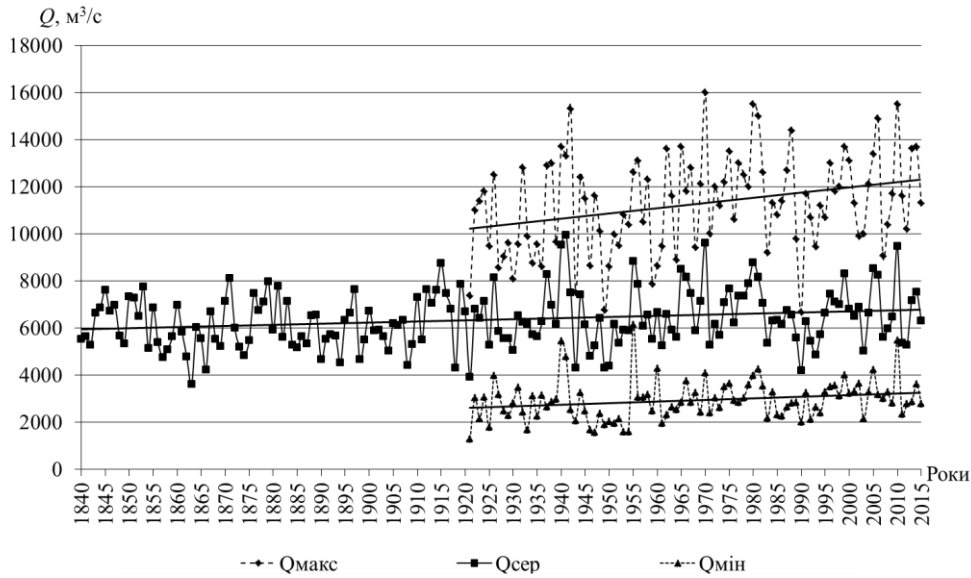


Рис. 3 – Хронологічні графіки середніх (1840-2015 рр.), максимальних і мінімальних (1921-2015 рр.) витрат води р. Дунай – м. Рені, m^3/c

Fig. 3 - Chronological graphs of average (1840-2015), maximum and minimum (1921-2015) discharges of the Danube River at Reni, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

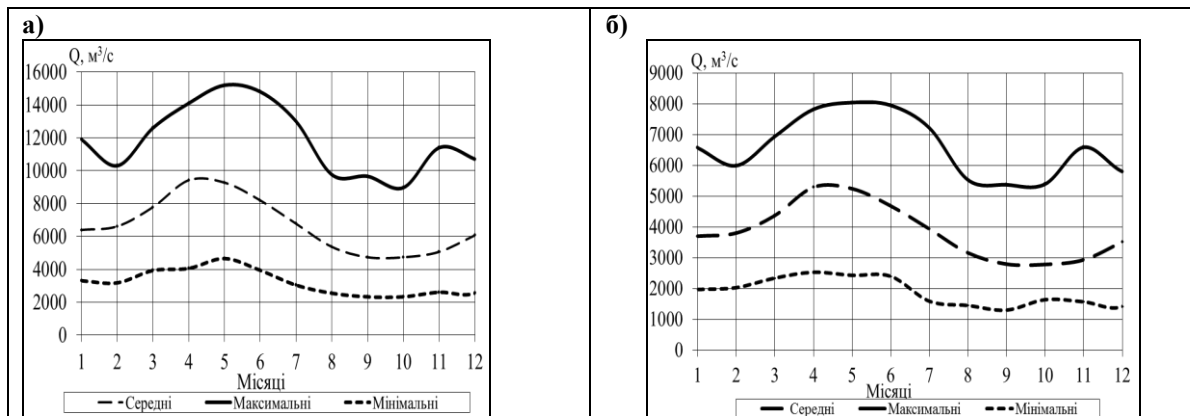


Рис. 4 – Внутрішньорічний хід середніх, максимальних і мінімальних місячних витрат води Дунаю у м. Рені (а) і м. Ізмаїл (б) (за період 1960-2015 рр.)

Fig. 4 - Annual distribution of average, maximum and minimum monthly discharges of the Danube river in Reni (a) and Izmail (b) (for the period 1960-2015)

Внутрішньорічний хід середніх, максимальних і мінімальних місячних витрат води Дунаю у м. Рені і м. Ізмаїл (1960-2015 рр.) (рис. 4) показав, що найбільша доля стоку припадає на весняно-літній період формування водопілля (зазвичай у багатоводні роки максимуми водопілля зміщуються до більш пізніх дат – травень-червень), а найменша – восени періоду формування меженого стоку. Крім того, у внутрішньорічному розподілі максимальних місячних величин стоку води вираженим є підвищення стоку в листопаді. В розподілі мінімальних місячних значень стоку води внутрішньорічний розподіл менш виражений.

4.3 Гідрологічний режим стоку наносів

Режим стоку наносів української частини Дунаю відрізняється значною різноманітністю і визначається, головним чином, гідрологічним режимом і стоком наносів верхньої і середньої частин річки, а також гірських річок (Тиса, Латориця, Уж, Прут), які стікають зі схилів Українських Карпат і знаходяться в басейні Дунаю [3-5]. Річки мають паводковий режим стоку та виносять значну кількість твердих осадів зі своїх басейнів. Так, найбільшу кількість наносів річки переносять у період весняного водопілля (48-50 % річної суми зважених наносів) та літніх паводків (36-43 %), а найменшу – в осінній

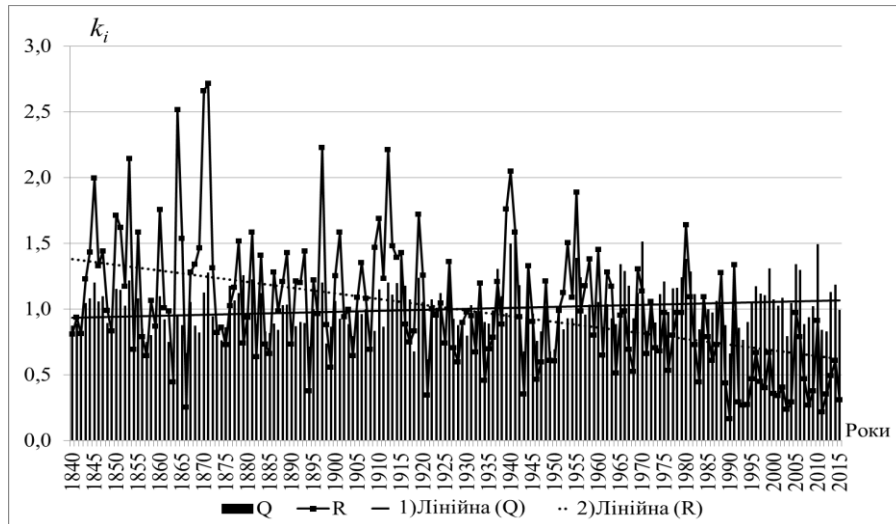


Рис. 5 – Хронологічні графіки середньорічних витрат зважених наносів та витрат води (1840-2015) р. Дунай – м. Рені (у модульних коефіцієнтах)

Fig. 5 - Chronological graphs of the average annual of suspended sediment discharges and discharges (1840-2015) of the Danube River at Reni (in modular coefficients)

період (7-15 %) [3]. Важливу роль стік води та нано-сів Дунаю відіграє в режимі Придунайських озер в періоди вільного надходження річкової води до водойм цих озер [5]. Побудований суміщений хронологічний графік середніх річних витрат зважених наносів та витрат води (у вигляді їх модульних коефіцієнтів) на р. Дунай – м. Рені (за період 1840-2015 рр.), показав наявність вираженого тренду до зменшення стоку зважених наносів на фоні не значного підвищення середньорічних витрат води (рис. 5). Найбільш інтенсивне зниження витрат зважених наносів відбувається у сучасний період водності р. Дунай (1990-2015 рр.).

Внутрішньорічний розподіл стоку зважених наносів у дельті р. Дунай тісно пов'язаний з внутрішньорічним розподілом стоку води річки. Збільшення стоку води зазвичай супроводжується збільшенням зважених наносів [5].

В роботі здійснений внутрішньорічний розподіл середньомісячних витрат зважених наносів р. Дунай по створах Рені і Ізмаїл для характерних за водністю років (за період 1978-2015 рр.). Графіки внутрішньорічного ходу витрат зважених наносів в групах різних за водністю років показані на рис. 6. Так, для обох постів в багатоводні та середньоводні роки величини стоку наносів в період весняного водопілля найбільш високі і майже однакові для цих років, нижчі вони у маловодні роки. Найменші у році величини витрати зважених наносів спостерігаються в період межені (у жовтні та листопаді) і не залежать від водності року. При цьому спостерігається зменшення витрат наносів по довжині річки від м. Рені до м. Ізмаїл.

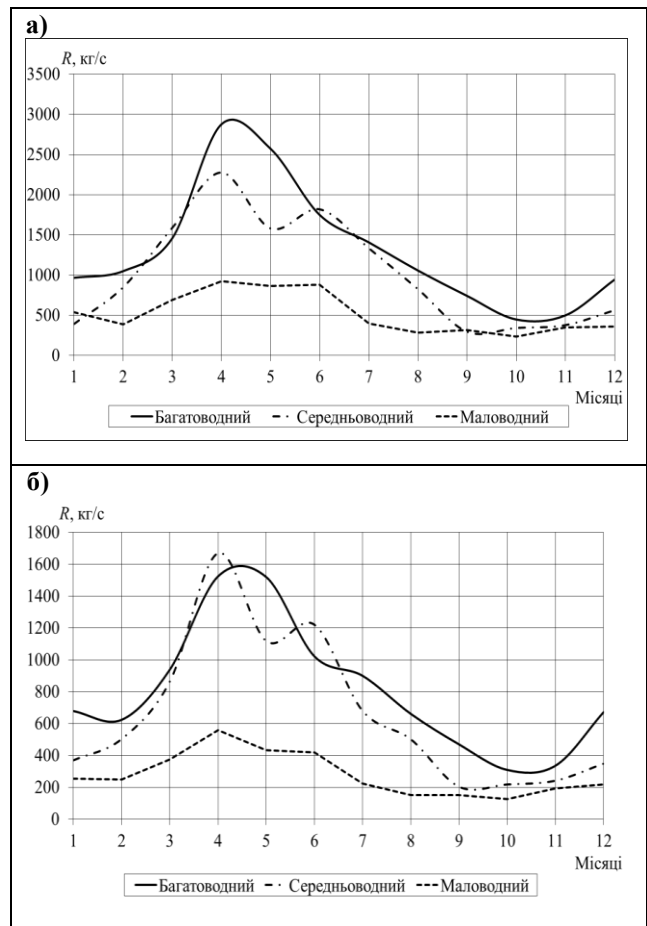


Рис. 6 – Внутрішньорічний розподіл витрат зважених наносів р. Дунай у м. Рені (а) та м. Ізмаїл (б) (за період 1978-2015 рр.)

Fig. 6 - Annual distribution of suspended sediment discharges of the Danube River at Reni (a) and Izmail (b) (for the period 1978-2015)

4.4 Гідрохімічний режим мінералізації води

Води гирлової області річки Дунай є основним джерелом прісної води для водопостачання, зрошування, риборозведення в посушливому регіоні півдня України, а також для наповнення водою Дунайських озер. Тому вивчення гідрохімічного режиму р. Дунай на українській ділянці нижче м. Рені має важливе значення при вирішенні різних дослідницьких завдань. Основним фактором, який обумовлює сольовий режим нижньої ділянки р. Дунай є водний режим річки. Збільшення річкового стоку річки, яке відбувається в теплу пору року, обумовлюється припливом з верхніх ділянок мало мінералізованої талої та дощової води. У холодну пору року приплив цієї води значно зменшується, що призводить до підвищення мінералізації води [5, 37].

В даній роботі виконаний аналіз багаторічного ряду (1981-2015 рр., тобто періодом 35 років) середньої річної мінералізації води р. Дунай в створах м. Рені та м. Ізмаїл. Побудований суміщений хронологічний графік середніх річних величин мінералізації та витрат води (у вигляді їх модульних коефіцієнтів) р. Дунай – м. Ізмаїл, показав наявність тенденцій до зменшення мінералізації на фоні не значного підвищення середніх річних витрат води (за період сумісних спостережень) (рис. 7).

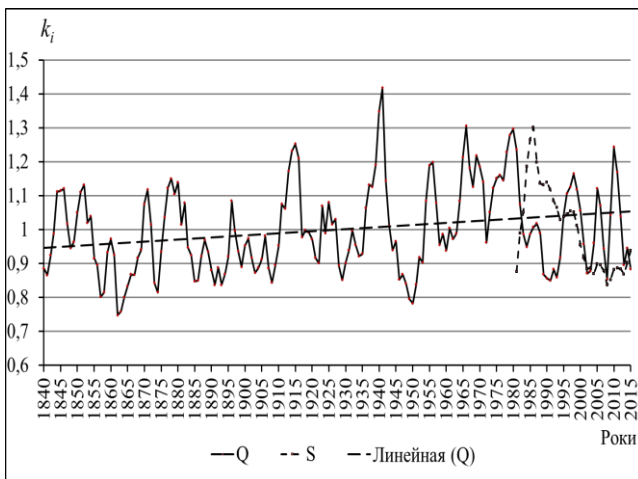


Рис. 7 – Хронологічні графіки середньорічної мінералізації води (1981-2015) та витрат води (1840-2015) р. Дунай – м. Ізмаїл (у модульних коефіцієнтах)

Fig. 7 - Chronological graphs of average annual of mineralization (1981-2015) and discharges (1840-2015) of the Danube River at Izmail (in modular coefficients)

Внутрішньорічний розподіл величин мінералізації води р. Дунай по створах Рені (г/с 54 миля) і Ізмаїл (г/с 115 км) було досліджено у зв'язку з розподілом років за їх водністю (за період 1981-2015 рр.). З цієї метою для багато-,

середньо- та маловодних років встановлені усереднені значення мінералізації Дунайської води по місяцях року і побудовані графіки внутрішньорічного ходу середньомісячної мінералізації р. Дунай в м. Ізмаїл в роки різної водності (рис. 8).

В цілому внутрішньорічний розподіл значень мінералізації води р. Дунай за даний період мало залежить від його водності. Але ж для всіх груп водності років виділяються періоди, які пов'язані з фазами водного режиму річки протягом року та господарським використанням вод, у тому числі водообміну з озерами. У середньоводні роки значення мінералізації у м. Ізмаїл коливаються в межах 377 мг/дм³ до 425 мг/дм³, а в багатоводні – 368 мг/дм³ до 411 мг/дм³, тобто мають близькі значення.

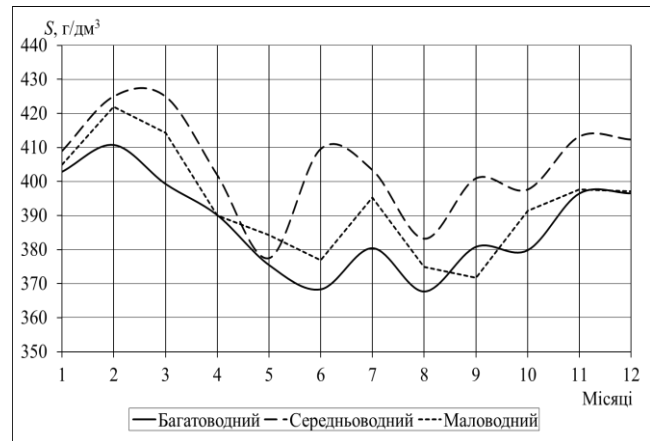


Рис. 8 – Внутрішньорічний розподіл мінералізації води р. Дунай – м. Ізмаїл (за період 1981-2015 рр.)

Fig. 8 - Annual distribution of mineralization of the Danube River at Izmail (for the period 1981-2015)

5. ВИСНОВКИ

Дане дослідження показало, що вивчення окремих складових гідрологічного та гідрохімічного режимів річки Дунай (в межах України) є практично необхідним у зв'язку з широким використанням вод для водопостачання і зрошення, а також для більш ефективного регулювання водно-сольового балансу Придунайських озер, для яких прісні води р. Дунай є основним джерелом їх водооновлення.

Результатами статистичного аналізу багаторічних рядів спостережень на р. Дунай на ділянці м. Рені – м. Ізмаїл стали наступні:

1. Часові тренди середніх, максимальних і мінімальних рівнів води (за період 1921-2015 рр.) показують наявність слабо вираженого зростання рівнів води протягом тривалого часу, з більш вираженим трендом для максимальних

рівнів води; їх внутрішньорічний хід показує загальну синхронність коливань.

2. Встановлено, що за зведеним часовим рядом середні (за період 1840-2015 рр., тривалістю 176 років), найбільші і найменші (1921-2015 рр., періодом 95 років) річні витрати води на 1,0-6,2 % нижче від значень цих величин періоду осереднення 1978-2015 рр., відповідно. При цьому має місце наявність слабо вираженого тренду до підвищення максимальних витрат води та не значного зростання середніх і мінімальних витрат води, а у внутрішньорічному ході більш вираженими сезонними коливаннями відрізняються максимальні місячні величини стоку води.

3. Виявлено наявність вираженого тренду до зменшення стоку зважених наносів на р. Дунай – м. Рені (за період 1840-2015 рр.) на фоні не значного підвищення середніх річних витрат води. Найбільш інтенсивне зниження витрат зважених наносів відбувається у сучасний період водності р. Дунай (1990-2015 рр.).

Здійснений внутрішньорічний розподіл середньомісячних витрат зважених наносів р. Дунай для характерних за водністю років (за період 1978-2015 рр.) показав, що в багатоводні та середньоводні роки найбільші величини стоку наносів спостерігаються в період весняного допілля, а найменші – в період межені і не залежать від водності року. При цьому спостерігається зменшення витрат наносів по довжині річки від м. Рені до м. Ізмаїл.

4. Хронологічний графік середніх річних величин мінералізації та витрат води р. Дунай (1981-2015 рр., періодом 35 років) показав наявність до зменшення мінералізації на фоні не значного підвищення середніх річних витрат води; у внутрішньорічному розподілі значень мінералізації води у всі групи водності років виділяються періоди, які пов'язані з фазами водного режиму річки протягом року та господарським використанням вод.

Таким чином, незначне підвищення у багаторічному періоді стоку води р. Дунай на ділянці м. Рені – м. Ізмаїл буде сприятиме розвитку господарства і водопостачання регіону, зрошувано-землеробства, регулюванню наповнення Придунайських озер слабо мінералізованими річними водами. При цьому зменшення стоку зважених наносів буде стримувати замулення підвідних каналів, що з'єднують озера з р. Дунай, що забезпечить покращення водообміну озер прісними водами річки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гидрологический справочник реки Дунай 1921-2010 / Дунайская комиссия. Будапешт. 2018. URL: http://www.danubecommission.org/uploads/doc/publication/2018/spravocnik_1921_2010.pdf. (дата обращения: 23.09.2020)
2. Паламарчук М. М., Закорчевна Н. Б. Водний фонд України : дов. пос. / за ред. Хорева В. М., Алієва К. А. Київ : Ніка-Центр, 2001. 392 с.
3. Общие сведения о реке Дунай / Дунайская комиссия. URL: <http://www.danubecommission.org/dc/ru/дунайское-судоходство/общие-сведения-о-реке-дунай/> (дата обращения: 25.06.2020)
4. Гидрология устьевой области Дуная / под ред. Никифорова Я. Д. и Дьякону К. Москва : Гидрометеоздат, 1963. 384 с.
5. Гидрология дельты Дуная / под. ред. Михайлова В. Н. Москва : ГЕОС, 2004. 448 с.
6. Бондар К. Тенденция и цикличность годового стока воды на Дунае у входа в дельту. *Сборник докладов XVI Конференции придунайских стран по гидрологическим основам водного хозяйства*, 18-22 мая 1992. Кельхейм. Национальный комитет ФРГ по МП ООН ЮНЕСКО. Кобленц, 1992. Том I. С. 321-325.
7. River discharge to the sea / Miliman J. D. et al. *A Global River Index / LOICZ Reports and studies*, 1995. 125 p.
8. Левашова Е. А., Михайлов В. Н., Михайлова М. В., Морозов В. Н. Естественные и антропогенные изменения стока воды и наносов в устье Дуная. *Водные ресурсы*. 2004. Том 31(3). С. 261-272.
9. Average daily discharge and annual peak discharge series collection / Pekárová P. et al. In: Pekárová P., Miklánek P. (eds.). *Flood regime of rivers in the Danube River basin. Follow-up volume IX of the Regional Co-operation of the Danube Countries in IHP UNESCO*. IH SAS, Bratislava, 2019. 215 p. + 527 p. app., <https://doi:10.31577/2019.9788089139460>
10. Streamflow trends in Switzerland / Birsan M.-V. et al. *Journal of Hydrology*. 2005. 314. Pp. 312-329.
11. Trends in hydrologischen Variablen und in der Wasserbilanz Österreichs / Fürst J. et al. U: *Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft (ur. Nachmebel H. P.), Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft*. Beč, Austrija, 2008. Pp. 105-115.
12. Flood regime of rivers in the Danube River basin / Pekárová P. et al. *Regional cooperation of Danube Countries within the framework of UNESCO International Hydrological Program*. 2008, PROJECT 9, 51 p.
13. Bormann H. Runoff regime changes in German rivers due to climate change. *Erdkunde*. 2010. 64 (3). Pp. 257-279.
14. Čanjevac I. Novije promjene protočni hrežimauhrvatskomdijeluporiječja Dunava. *Hrvatski geografski glasnik*. 2012. 74(1). Pp. 61-74.
15. Changes in long-term properties of the Danube river level and flow induced by damming / Stratimirović D. et al. *Water Resources Research*. 2019. Pp. 1-25.
16. Zabolotnia T., Gorbachova L., Khrystiuk B. Estimation of the long-term cyclical fluctuations of snow-rain floods in the Danube basin within Ukraine. *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2019. Vol. 7(2). Pp. 1-12.
17. Pekárová P., Miklánek P. (eds.). Flood regime of rivers in the Danube River basin. Follow-up volume IX of the Regional Co-operation of the Danube Countries in IHP UNESCO. IH SAS, Bratislava, 2019. 215 p. + 527 p. app., <https://doi:10.31577/2019.9788089139460>

18. Stagl J. C., Hattermann F. F. Impacts of Climate Change on the Hydrological Regime of the Danube River and Its Tributaries Using an Ensemble of Climate Scenarios. *Water*. 2015. 7. Pp. 6139-6172. <https://doi:10.3390/w7116139>
19. Impact of a changing climate, land use, and water usage on water resources in the Danube river basin / Bisselink B. et al. *EUR 29228 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-7985889-5, JRC111817*. 2018. Pp. 3-70. <https://doi:10.2760/89828>
20. Лобода Н. С., Божок Ю. В. Оцінка змін водних ресурсів річки Дунай у XXI сторіччі за сценарієм А1В з використанням моделі «клімат-стік». *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. № 18. С. 112-122.
21. Changing climate shifts timing of European foods / Blöschl G. et al. 2017, *Science*, 357. Pp. 588-590.
22. Temporal variation of water discharges in the lower course of the Danube River across the area from Reni to Izmail under the influence of natural and anthropogenic factors / Romanova Y. et al. *Energetika*. 2019. Т. 65(2-3). Pp. 144-160. <https://doi.org/10.6001/energetika.v65i2-3.4108>
23. Шуйський Ю. Д. Про антропогенні та природні перетворення в дельті Дунаю. *Збірник наукових праць VI Міжнародної конференції Фальцфейнівські читання, 21-23 травня*. Херсон : ПП Вишемирський, 2009. С. 455-450.
24. Черой А. И., Картелян В. Ф. Перераспределение стока воды и наносов в Килийской дельте Дуная в условиях существования ГСХ «Дунай – Черное море». *Тезисы VII Международной научно-практической конференции Pontus Euxinus 2011 по проблемам водных экосистем, посвященная 140-летию Института биологии южных морей Национальной академии наук Украины, 24-27 мая*. Севастополь : ЭКОСИ. Гидрофизика, 2011. С. 254-255.
25. Bondar C., ioRDaChe G. Sediment transport on the Romanian section of the Danube River. *Geo-Eco-Marina*. 2016. 22. Pp. 83-108.
26. Panin N., Jipa D. Danube river sediment input and its interaction with the north-western Black Sea: results of EROS-2000 and EROS-21 projects. *National Institute of Marine Geology and Geo-ecology GeoEcoMar, Dimitrie Onciul Street*. No. 23-25. Pp. 1-14.
27. Baranya S., Józsa J. Estimation of suspended sediment concentrations with ADCP in River Danube. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2013. 61(3). Pp. 232-240.
28. Tamás E. A., Ficsor J. Questions in the quantitative analysis of sediment load – example of three major rivers in Hungary. *E3S Web of Conferences 40, 04023, River Flow*. 2018. Pp. 1-10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184004023>
29. Процеси формування хімічного складу поверхневих вод / Осадчий В. І. та ін. Київ : Ніка-Центр, 2013. 240 с.
30. Хільчевський В. К., Осадчий В. І., Курило С. М. Регіональна гідрохімія України : підручник : ВПЦ «Київський університет», 2019. 343 с.
31. Осадчий В. І. Ресурси та якість поверхневих вод України в умовах антропогенного навантаження та кліматичних змін. *За матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 31 травня 2017 року*. ISSN 1027-3239. *Вісник НАН України*. 2017. № 8. С. 29-45.
32. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2011-2015 рр. та весь період спостережень). Частина 1. Річки. Випуск 1. Басейни Західного Бугу, Дунаю, Дністра, Південного Бугу. Довідкове видання. Київ, 2017. 465 с.
33. Ресурсы поверхностных вод СССР. Украина и Молдавия. Вып. 1. Западная Украина и Молдавия / под ред. М. С. Каганера. Т. 6. Ленинград: Гидрометеоздат, 1969. 884 с.
34. Ресурсы поверхностных вод СССР. Описание рек и озер и расчеты основных характеристик их режима. «Украина и Молдавия», Том 6. Вып. 1, Западная Украина и Молдавия (без бассейна р. Днестр) / под ред. М. С. Каганера. Ленинград: Гидрометеоздат, 1978. 491 с.
35. Вишневський В. І., Косовець О. О. Гідрологічні характеристики річок України. Київ: Ніка Центр, 2003. 324 с.
36. Швєбс Г. І., Ігошин М. І. Каталог річок і водойм України : навч.-дов. пос. Одеса : Видавництво Астропринт, 2003. 392 с.
37. Тимченко В. М. Экологическая гидрология водоемов Украины. Київ: Наукова думка, 2006. 383 с.
38. СНІП 2.01.14-83. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Государственный гидрологический институт. Ленинград : Гидрометеоздат, 1984. 447 с.
39. Щербак А. В. Осенне-зимний ледовый режим советского участка р. Дуная. *Труды УкрНИГМИ*. 1970. Вып. 97. С. 70-83.
40. Gorbachova L., Khrystyuk B. The dynamics and probabilistic characteristics of the ice phenomena of the Danube River and its Kiliysky channel. *Conference proceeding «Water resource and wetlands»: 14-16 September, Tulcea, Romania*. / Edited by: Casretescu P, Lewis W., Bretcan P. 2012. Pp. 319-324.

REFERENCES

1. *Gidrologicheskiy spravochnik reki Dunay 1921-2010 / Dunajskaja komissija. Budapesht [Danube River Hydrological Guide 1921-2010 / Danube Commission]*. Available at: http://www.danubecommission.org/uploads/doc/publication/2018/spravocnik_1921_2010.pdf. (Accessed: 23.09.2020). Budapesht. (in Russ.)
2. Palamarchuk, M.M. & Zakorchevna, N.B. (2001). *Vodnyi fond Ukrainy [Water Fund of Ukraine]*: Edited by Khoriev V. M., Aliiev K. A. Kyiv: Nika-Tsentr. (in Ukr.)
3. *Obshchie svedeniya o reke Dunay / Dunayskaya komissiya [General information about the Danube River / Danube Commission]*. Available at: <http://www.danubecommission.org/dc/ru/дунайское-судоходство/общие-сведения-о-реке-дунай/> (Accessed: 25.06.2020). (in Russ.)
4. Nikiforova, Ja.D. (ed.). (1963). *Gidrologiya ust'evoy oblasti Dunaya [Hydrology of the Danube estuary]*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russ.)
5. Mihajlova, V.N. (2004). *Gidrologija del'ty Dunaja [Danube Delta hydrology]*. Moscow: GEOS Publ. (in Russ.)
6. Bondar, K. (1992) [The trend and cyclical nature of the annual flow of water on the Danube at the entrance to the delta]. *Sbornik dokladov XVI Konferentsii pridunayskikh stran po gidrologicheskim osnovam vodnogo hozyaystva [Collection of reports of the XVI Conference of the Danube countries on the hydrological foundations of water management]*, 18-22 may. Kelheim. National Committee of the Federal Republic of Germany for UNESCO IHP. Koblenz, pp. 321-325. (in Russ.)
7. Miliman, J.D. et al. (1995). River discharge to the sea. *A Global River Index / LOICZ Reports and studies*, 125 p.
8. Levashova, E.A. et al. (2004). Estestvennye i antropogennye izmeneniya stoka vody i наносов v ust'e Dunaya [Natural and anthropogenic changes in water and sediment runoff at the Danube estuary]. *Vodnye resursy [Water resources]*, 31(3), pp. 261-272. (in Russ.)
9. Pekárová, P. et al. (2019). Average daily discharge and

- annual peak discharge series collection. *Flood regime of rivers in the Danube River basin. Follow-up volume IX of the Regional Co-operation of the Danube Countries in IHP UNESCO. IH SAS*. Edited by Pekárová P., Miklánek P. Bratislava, 215 p. + 527 p. <https://doi.org/10.31577/2019.9788089139460>
10. Birsan, M.-V. et al. (2005). Streamflow trends in Switzerland, *Journal of Hydrology*, 314, pp. 312-329.
 11. Fürst, J. et al. (2008). Trends in hydrological variables and in Austria's water balance: Effects of climate change on Austrian water management. *Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft*. Edited by Nachtnebel H. P. Beč, Austrija, pp. 105-115.
 12. Pekárová, P. et al. (2008). Flood regime of rivers in the Danube River basin, *Regional cooperation of Danube Countries within the framework of UNESCO International Hydrological Program, PROJECT 9*, 51 p.
 13. Bormann, H. (2010). Runoff regime changes in German rivers due to climate change. *Erdkunde*, 64(3), pp. 257-279.
 14. Čanjevac, I. (2012). [Recent changes in flow ridges in the Croatian part of the Danube basin]. *Hrvatski geografski glasnik [Croatian Geographical Bulletin]*, 74(1), pp. 61-74.
 15. Stratimirović, D. et al. (2019). Changes in long-term properties of the Danube river level and flow induced by damming. *Water Resources Research*, pp. 1-25.
 16. Zabolotnia, T., Gorbachova, L. & Khrystiuk, B. (2019). Estimation of the long-term cyclical fluctuations of snow-rain floods in the Danube basin within Ukraine. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 7(2), pp. 1-12.
 17. Pekárová, P., Miklánek, P. (eds.). (2019). Flood regime of rivers in the Danube River basin. Follow-up volume IX of the Regional. *Co-operation of the Danube Countries in IHP UNESCO. IH SAS*, Bratislava, 215 p. + 527 p. <https://doi.org/10.31577/2019.9788089139460>
 18. Stagl, J.C. & Hattermann, F.F. (2015). Impacts of Climate Change on the Hydrological Regime of the Danube River and Its Tributaries Using an Ensemble of Climate Scenarios. *Water*, 7, pp. 6139-6172. <https://doi.org/10.3390/w7116139>
 19. Bisselink, B. et al. (2018). Impact of a changing climate, land use, and water usage on water resources in the Danube river basin, EUR 29228 EN. *Publications Office of the European Union*, Luxembourg, pp. 3-70. <https://doi.org/10.2760/89828>
 20. Loboda, N.S., & Bozhok, Yu.V. (2016) [Assessment of water resources change of the Danube river in the XXI Century under the scenario A1B using the model «climate-runoff»], *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 18, pp.112-122. (in Ukr.)
 21. Blöschl, G. et al. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357, pp. 588-590.
 22. Romanova, Y. et al. (2019). Temporal variation of water discharges in the lower course of the Danube River across the area from Reni to Izmail under the influence of natural and anthropogenic factors. *Energetika*, 65, pp. 144-160. <https://doi.org/10.6001/energetika.v65i2-3.4108>
 23. Shuiskyi, Yu.D. (2009). Pro antropohenni ta pryrodni peretvorennia v delti Dunaiu. [On anthropogenic and natural transformations in the Danube Delta]. *Zbirnyk naukovykh prats VI Mizhnarodnoi konferentsii Faltsfeinivski chytannia [Proceedings of the VI International Conference Faltsfein Readings]*, 21-23 may. Kherson: PP Vyshemyrskyi, pp. 455-450. (in Ukr.)
 24. Cheroj, A.I. & Karteljan, V.F. (2011). [Redistribution of water and sediment runoff in the Kiliya delta of the Danube under the conditions of the existence of the state agricultural holding "Danube - Black Sea"]. *Tezisy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Pontus Euxinus 2011 po problemam vodnykh ekosistem, posvyashchennaya 140-letiyu Instituta biologii yuzhnykh morey Natsional'noy akademii nauk Ukrainy [Abstracts of the VII International Scientific and Practical Conference Pontus Euxinus 2011 on the Problems of Aquatic Ecosystems, dedicated to the 140th anniversary of the Institute of Biology of the Southern Seas of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, 24-27 may. Sevastopol': JeKOSI. Gidrofizika, pp. 254-255. (in Russ.)
 25. Bondar, C. & ioRDaChe, G. (2016). Sediment transport on the Romanian section of the Danube River, *Geo-Eco-Marina*, 22, pp. 83-108.
 26. Panin, N. & Jipa, D. Danube river sediment input and its interaction with the north-western Black Sea: results of EROS-2000 and EROS-21 projects, *National Institute of Marine Geology and Geo-ecology GeoEcoMar, Dimitrie Onciul Street*, No. 23-25, pp. 1-14.
 27. Baranya, S. & Józsa, J. (2013). Estimation of suspended sediment concentrations with ADCP in River Danube, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(3), pp. 232-240.
 28. Tamás, E.A. & Ficsor, J. (2018). Questions in the quantitative analysis of sediment load – example of three major rivers in Hungary. *E3S Web of Conferences* 40, 04023, *River Flow*. pp. 1-10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184004023>
 29. Osadchyi, V.I. (ed.). (2013). *Protsesy formuvannia khimichnoho skladu poverkhnevnykh vod [Processes of formation of chemical composition of surface waters]*. Kyiv: Nika-Tsentr Publ. (in Ukr.)
 30. Khilchevskiy, V.K., Osadchyi V.I. & Kurylo S.M. (2019). *Regional hydrochemistry of Ukraine*. VPTs «Kyivskiy universytet» Publ. (in Ukr.)
 31. Osadchyi, V.I. (2017). [Resources and quality of surface waters of Ukraine in the conditions of anthropogenic loading and climate change]. *Za materialamy naukovoi dopovidni na zasidanni Prezydii NAN Ukrainy Visnyk NAN Ukrainy [According to the scientific report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine. Bulletin of the NAS of Ukraine]*. 31 may, vol. 8, pp. 29-45. (in Ukr.)
 32. Derzhavnyi vodnyi kadastr. Bahatorichni dani pro rezhym ta resursy poverkhnevnykh vod sushi (za 2011-2015 rr. ta ves period sposterezhen) [State Water Cadastre. Long-term data on the regime and resources of land surface waters (for 2011-2015 and the entire observation period)]. (2017). Issue 1. *Richky [Rivers]*. Vol. 1. *Baseiny Zakhidnoho Buhu, Dunaiu, Dnistra, Pivdennoho Buhu. Dovidkove vydannia [Basins of the Western Bug, Danube, Dniester, Southern Bug. Reference edition]*. Kyiv. (in Ukr.)
 33. Kaganer, M.S. (ed). (1969) *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Zapadnaya Ukraina i Moldaviya [Resources of surface waters of the USSR. Ukraine and Moldova]*. Issue 1: *Zapadnaya Ukraina i Moldaviya [Western Ukraine and Moldova]*. Leningrad: Giometeozidat Publ. (in Russ.)
 34. Kaganer, M.S. (ed). (1978). *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Opisanie rek i ozer i raschety osnovnykh kharakteristik ikh rezhima [Resources of surface waters of the USSR. Description of rivers and lakes and calculations of the main characteristics of their regime]*. Issue 1: *Zapadnaya Ukraina i Moldaviya [Western Ukraine and Moldova]*. Leningrad: Giometeozidat Publ. (in Russ.)
 35. Vyshnevskiy, V.I. & Kosovets, O.O. (2003). *Hidrolohichni kharakterystyky richok Ukrainy [Hydrological characteristics of rivers of Ukraine]*. Kyiv: Nika Tsentr Publ. (in Ukr.)
 36. Shvebs, H.I. & Ihoshyn, M.I. (2003). *Kataloh richok i vodoim Ukrainy [Catalog of rivers and reservoirs of*

- Ukraine]. Odesa: Vydavnytstvo Astroprint Publ. (in Ukr.)
37. Tymchenko, V.M. (2006). *Ekologicheskaya gidrologiya vodoemov Ukrainy [Ecological hydrology of water bodies of Ukraine]*. Kyiv: Naukova dumka Publ. (in Ukr.)
38. State Hydrological Institute (1984). SNiP 2.01.14-83. *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik [Manual for the determination of calculated hydrological characteristics]*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russ.)
39. Shherbak, A.V. (1970). [Autumn-winter ice regime of the Soviet section of the river Danube]. *Trudy UkrNIGMI [Proceedings UkrSRHMI]*, 97. pp. 70-83. (in Russ.)
40. Gorbachova, L. & Khrystyuk, B. (2012). The dynamics and probabilistic characteristics of the ice phenomena of the Danube River and its Kiliysky channel. *Conference proceeding «Water resource and wetlands»*, 14-16 September. Tulcea, Romania, pp. 319-324.

RESEARCH OF INDIVIDUAL COMPONENTS OF HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL REGIMES OF THE DANUBE RIVER WITHIN THE UKRAINIAN INTERVAL FROM RENI TO IZMAIL

Zh. R. Shakirzanova¹, N. S. Kichuk¹, Ye. O. Romanova¹,
I. D. Kichuk¹, Yu. S. Medvedieva²

¹*Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, jannetodessa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5657>*

²*National University "Odessa Maritime Academy", 8, Didrichson St., 65029, Odesa, Ukraine*

Introduction. This investigation aims at studying the individual components of the hydrological and hydrochemical regimes of the Danube River (within Ukraine) in connection with the widespread use of the river's water for water supply and irrigation in the southern region, as well as to ensure more effective regulation of water-salt regime of the Danube lakes using the Danube River as a main source for their water renewal. One of important aspects includes the study of the regime of the Danube River's suspended sediments brought to its delta due to their impact on the formation of the delta at the river's mouth of as well as due to the impact on siltation of deltaic and pre-delta lakes and canals connecting the lakes with the Danube River.

Purpose. The purpose of the work is to study long-term and current trends related to changes in hydrological (water levels and discharges, suspended sediments runoff) and hydrochemical (mineralization) regimes of the Danube River within the Ukrainian interval from Reni to Izmail, internal annual distribution of water runoff, as well as suspended sediments runoff and mineralization during the years of varying water content.

Results. The statistical analysis of long-term series of observations over the Danube River within the interval from Reni to Izmail resulted in discovering that time trends of average, maximum and minimum water levels (1921-2015) and discharges (1840-2015) indicate the presence of a weak increase in their growth over time, with a more pronounced increase in maximum water levels or discharges. The annual distribution shows the general synchronicity of fluctuations in runoff characteristics, and the maximum monthly values of water discharge differ have more pronounced seasonal fluctuations.

The study shows the presence of a pronounced trend to reduction of suspended sediments runoff of the Danube River at Reni (for the period of 1840-2015), with their most intensive decrease over the period of 1990-2015. Annual distribution of average monthly suspended sediments runoff of the Danube River for the years with typical water content (for the period of 1978-2015) showed that they have seasonal fluctuations. At the same time, there is a decrease in the suspended sediments runoff along the length of the river from Reni to Izmail.

The long-term course of average annual mineralization values of the Danube River at Izmail (1981-2015) is characterized by their decrease against the background of a small increase in average annual discharges. As per the annual distribution of mineralization values associated with all water content groups there are the periods related to the phases of the river's yearly water regime during and the economic use of water.

Conclusion. Thus, the increase in the long-term period of the Danube River runoff within the interval from Reni to Izmail will contribute to the development of the region's economy and water supply, irrigated farming, regulation of the Danube Lakes filling with weakly mineralized river

water. At the same time, the reduction of the suspended sediments runoff will restrain the siltation of the inlet canals connecting the lakes with the Danube River, which will improve the water renewal of the lakes with the river's fresh waters.

Key words: water regime of the Danube River; suspended sediments regime; mineralization; long-term tendencies, annual distribution.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО И ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ РЕКИ ДУНАЙ НА УКРАИНСКОМ УЧАСТКЕ РЕНИ-ИЗМАИЛ

Ж. Р. Шакирзанова¹, Н. С. Кичук¹, Е. А. Романова¹,
И. Д. Кичук¹, Ю. С. Медведева²

¹Одесский государственный экологический университет
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, jannetodessa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5657>

²Национальный университет «Одесская морская академия»
ул. Дидрихсона, 8, Одесса 65029, Одесса, Украина

Данное исследование направлено на изучение отдельных составляющих гидрологического и гидрохимического режимов реки Дунай (в пределах Украины) в связи с широким использованием ее вод для водоснабжения и орошения в южном регионе страны, а также для более эффективного регулирования водно-солевого режима Придунайских озер, для которых пресные воды Дуная являются основным источником их водовозобновления.

В результате статистического анализа многолетних рядов наблюдений на р. Дунай на участке Рени-Измаил получено, что временные тенденции средних, максимальных и минимальных уровней (1921-2015 гг.) и расходов (1840-2015 гг.) воды указывают на наличие слабо выраженного их роста в течение многолетнего периода, с более выраженным повышением максимальных уровней или расходов воды. Внутригодовой ход показывает общую синхронность колебаний характеристик стока, а более выраженными сезонными колебаниями отличаются максимальные месячные величины расходов воды.

Выявлено наличие выраженного тренда к уменьшению стока взвешенных наносов на р. Дунай – г. Рени (за период 1840-2015 гг.), с наиболее интенсивным их снижением в период 1990-2015 гг. Внутригодовое распределение среднемесячных расходов взвешенных наносов р. Дунай для характерных по водности лет (за период 1978-2015 гг.) показал, что они имеют сезонные колебания. При этом наблюдается уменьшение расходов наносов по длине реки – от г. Рени до г. Измаил.

В многолетнем ходе средних годовых величин минерализации р. Дунай – г. Измаил (1981-2015 гг.) имеет место их уменьшение на фоне незначительного повышения средних годовых расходов воды; во внутригодовом распределении значений минерализации воды во все группы водности лет выделяются периоды, связанные с фазами водного режима реки в течение года и хозяйственным использованием вод.

Ключевые слова: водный режим р. Дунай, режим наносов, минерализация воды, многолетние тенденции, внутригодовое распределение

Подання до редакції: 11. 11. 2020
Надходження остаточної версії: 23. 11. 2020
Публікація статті: 17. 12. 2020

УДК 551.468.4

МОДЕЛЮВАННЯ МІНЛИВОСТІ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОЙМИ САСИК ЗА РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ЇЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ

Д. В. Кушнір, Ю. С. Тучковенко

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

В роботі висвітлено результати адаптації до умов водоймища Сасик та верифікації чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D Flexible Mesh (FM), а також застосування цієї моделі для оцінки очікуваної просторово-часової мінливості солоності вод у водоймі після її ренатуралізації в морський лиман шляхом встановлення постійного водообміну лиману з морем через штучний з'єднувальний канал.

Наприкінці 70-х років ХХ століття морський лиман Сасик був відокремлений від моря і перетворений у прісноводне водосховище. Однак, через низькі показники якості вод водосховища у сучасний період особливої актуальності набуло вирішення задачі повернення водоймі первісного статусу морського лиману, тобто її ренатуралізації.

Отримані результати моделювання мінливості гідрологічних характеристик водосховища Сасик за умов 2019 року свідчать про можливість застосування гідротермодинамічної моделі для оцінки ефективності та можливих наслідків прийняття різних сценарних рішень щодо управління гідрологічним режимом водойми при різних варіантах її експлуатації.

Модель Delft3D FM була використана для оцінювання часу водооновлення лиману Сасик морськими водами, а також характеру коливань солоності його вод після відновлення зв'язку з морем через штучно створений у пересипу сполучний канал «море-лимани» шириною 100 м та глибиною 1,5 м. Сценарне моделювання виконувалось за гідрометеорологічних умов 2019 року для двох послідовних років. В перший рік моделювання розглядався варіант водного менеджменту, коли надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик» відсутнє, а канал «море-лимани» відкритий протягом року. В другий рік моделювання за початкові умови приймалися результати розрахунків на кінець першого року, а зовнішній вплив в моделі залишався незмінним. Для другого року розрахунків додатково розглядався варіант надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик» протягом травня-липня.

За результатами моделювання встановлено, що у разі забезпечення протягом року постійного водообміну лиману з морем через з'єднувальний канал «море-лимани» (із вказаними морфометричними характеристиками) і відсутності надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик»: 1) час повного водооновлення лиману складе 1 рік і 5 місяців; 2) стабілізація солоності вод в лимані не відбудеться, тобто в багаторічній перспективі буде відбуватись засолення вод лиману; 3) проміжок часу з моменту початку водообміну з морем, протягом якого буде досягнута критична для існування прісноводних видів флори і фауни межа 7-8‰ солоності вод в лимані, складає для південної частини лиману приблизно 4 місяці, а для північної – 5,5 місяців; після цього почнеться формування морської екосистеми водоймища.

Показано, що стабілізація солоності вод у лимані в другий рік моделювання може бути досягнута у разі забезпечення надходження до лиману дунайських вод протягом періоду, коли відмітки рівня води в р. Дунай значно перевищували відмітки рівня води в лимані (травень-липень 2019 р.).

Ключові слова: лиман Сасик, ренатуралізація, гідрологічні характеристики, моделювання, верифікація, водообмін з морем

1. ВСТУП

Водосховище Сасик розташоване на півдні Одеської області (29,653 сх.д., 45,666 пн.ш.), поблизу від дельти р. Дунай (рис. 1). При відмітці рівня води у водоймі 0 м БС площа його акваторії становить близько 210 км². Довжина водо-

йми з півночі на південь складає 29 км, а ширина змінюється від 3 до 12 км. Максимальна глибина у водосховищі досягає 3 м. В північну частину лиману в окремі місяці року надходить стік річок Когильник та Сарата.

До кінця 70-х років ХХ ст. водосховище Сасик являло собою напівзакритий лиман, водооб-

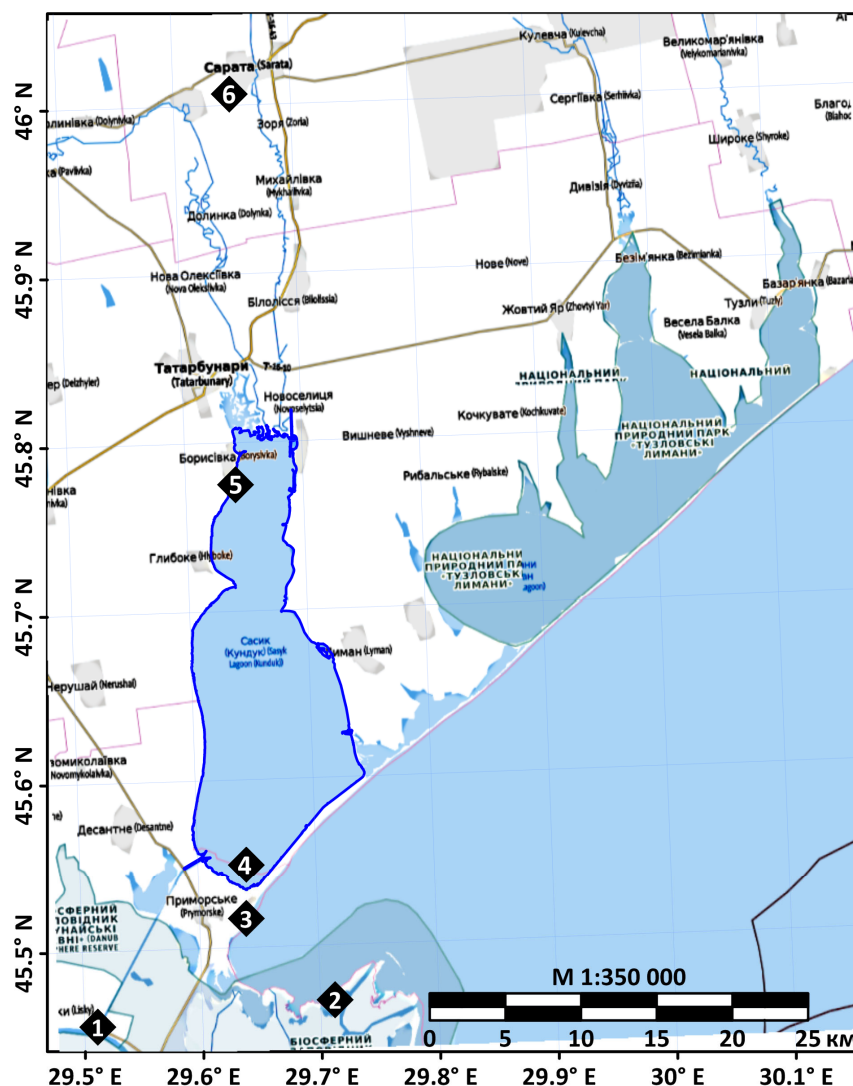


Рис. 1 – Схема розташування водойми Сасик в межах Татарбунарського та Кілійського районів Одеської області: 1 – головний шлюз водопропуску «Дунай-Сасик»; 2 – морський гідрологічний пост «Усть-Дунайськ»; 3 – морський гідрологічний пост «Приморське»; 4 – контрольна точка для аналізу результатів моделювання у південній частині лиману; 5 – гідрологічний пост у с. Борисівка; 6 – ГМС «Сарата» (WMO ID=33896)

Fig. 1 – Map showing the location of the Sasyk Reservoir within the boundaries of Tatarbuniar and Kiliya districts of Odessa Region: 1 – main sluice of the “Danube-Sasyk” flume line; 2 – “Ust-Dunaysk” gaging station; 3 – “Prymorske” gaging station; 4 – observation point in the southern part of the lagoon for model results analysis; 5 – gaging station near Borysivka village; 6 – “Sarata” hydrometeorological station (WMO ID=33896)

мін якого з морем відбувався епізодично за рахунок утворення тимчасових прірв у піщаному пересипу, який відокремлює водойму від Жебриянівської затоки північно-західної частини Чорного моря. Періодичність утворення та діяльності прірв регулювалася природними чинниками: змінами рівнів моря та лиману, впливом штормів з боку моря на піщаний пересип. Прірви утворювались в період сильних штормів восени та навесні і могли існувати протягом багатьох років [1, 2]. Так, за свідченням [1], в період з 1958 до 1971 роки лиман сполучався з морем

через Кундуцьку прірву, розташовану в центральній частині пересипу. В 1958 р. пересип лиману був розмитий під час весіннього шторму в місці розташування цієї прірви на ділянці протяжністю 3 км. В [3] згадується про промоїну Вовчек, шириною 100-300 м і глибиною 3-5 м, яка проіснувала декілька років.

В той же час відомо, що з 1947 по 1950 роки більшу частину часу зв'язок з морем був відсутній, а в 1946 та 1951-1952 роках – в основному наявний [2].

Мінералізація вод лиману Сасик з кінця ХІХ до першої половини ХХ ст. коливалась у межах 12-28 г/л, з максимальними значеннями в періоди ізоляції лиману від моря [4]. З 1958 р., коли зв'язок лиману з морем здійснювався через Кундуцьку прірву, мінералізація води змінювалась від 2 г/дм³ у верхів'ях лиману до 18 г/дм³ на прилеглих до пересипу ділянках акваторії.

У 1978 році, в результаті реалізації проекту створення Дунай-Дністровської зрошувальної системи, лиман Сасик був відокремлений від моря шляхом розширення та укріплення піщаного морського пересипу, по якому було прокладено автодорогу. Разом з цим, лиман був з'єднаний з р. Дунай штучним каналом загальною довжиною близько 13,5 км, обладнаним системою пропускних шлюзів та рибозагороджувальних споруд. Тобто лиман був штучно перетворений у водосховище [5, 6].

У теперішній час водойма не функціонує в якості, передбаченого проектом водогосподарського комплексу, прісноводного водосховища через незадовільні показники якості його вод (високий рівень мінералізації, перевищення вмісту хлоридів, сульфатів, забруднення важкими металами, фенолами, пестицидами). Вода Сасика непридатна як для забезпечення комунально-побутових потреб і питного водопостачання населенню, так і для зрошення земель [4-7]. Через значне зниження якості рибних ресурсів в результаті погіршення загального санітарно-гігієнічного стану водойми в умовах слабкого водообміну, ефективне використання вдсх. Сасик в рибогосподарських цілях також є проблематичним. До основних гідроекологічних проблем водосховища відносяться також підвищений рівень евтрофікації його вод, цвітіння синьо-зелених водоростей, постійне занесення каналу «Дунай-Сасик» та поступове обміління через відкладення зважених наносів, що надходять з дунайськими водами, у південній частині водоймища.

В цілому, стан екосистеми водосховища на сучасному етапі можна охарактеризувати як напружений і нестабільний, тобто як стан екосистеми штучної водойми, який має обмежені можливості для саморегулювання і залежить, головним чином, від зовнішніх чинників.

Незадовільний екологічний стан вдсх. Сасик і нераціональне використання його природних ресурсів призводять до виникнення соціальної напруженості в регіоні. З метою попередження негативних санітарно-епідеміологічних ризиків та вирішення низки екологічних, соціальних та економічних проблем, які пов'язані з подальшим

використанням водойми Сасик як водосховища, та реалізації прав місцевих громад на безпечне довкілля, Одеською обласною радою було прийнято рішення від 30.10.2015 р. № 1454-VI «Про відновлення екосистеми морського лиману Сасик та реабілітацію прилеглих територій». В цьому рішенні визначається необхідність відновлення природної екосистеми (ренатуралізації) морського лиману Сасик шляхом забезпечення вільного водообміну між ним і морем через штучний з'єднувальний канал (або канали).

Вирішення проблеми повернення водоймі Сасик природного статусу «лиману» повинне ґрунтуватися на детальних науково-обґрунтованих інженерних рішеннях для запобігання виникненню непередбачуваних негативних екологічних і соціально-економічних наслідків, в тому числі зайвих ресурсних і фінансових втрат. Серед інших, повинні бути надані обґрунтовані відповіді на наступні питання:

- визначення оптимальної кількості, морфометричних характеристик (ширина, глибина) та місць розташування каналів (каналів), які з'єднають водойму з морем для забезпечення максимального водооновлення лиману морськими водами;
- визначення кратності водооновлення водойми морськими водами у обраному варіанті та режимі експлуатації каналу (каналів);
- визначення: оптимального режиму та умов надходження морських вод до водойми в період перетворення прісноводної екосистеми в морську; необхідних заходів щодо мінімізації негативних гідроекологічних наслідків цього процесу; часу необхідного для розвитку та сталого функціонування морської екосистеми;
- оцінка очікуваних гідроекологічних характеристик лиману в умовах оптимального функціонування з'єднувального каналу (каналів), зокрема, просторово-часової мінливості солоності води;
- оцінка інтенсивності занесення каналу (каналів) піском з боку моря та витрат на підтримання його в робочому, передбаченому проектом стані; обґрунтування необхідності будівництва гідротехнічних споруд для зменшення постійних витрат коштів на розчищення каналу та забезпечення його (їх) безперервної роботи.

Вирішення визначених вище задач може бути забезпечено застосуванням сучасних чисельних математичних моделей.

Мета роботи полягає у викладенні результатів адаптації до умов водоймища Сасик та верифі-

кації чисельної гідродинамічної моделі Delft3D Flexible Mesh, а також у проведенні попередньої оцінки очікуваної просторово-часової мінливості солоності вод лиману після встановлення режиму постійного водообміну лиману з морем.

Особливості стаціонарної вітрової циркуляції вод в лимані Сасик, за результатами моделювання із використанням методу повних потоків, вперше обговорювались в роботі [8]. Задача визначення на підставі результатів чисельного гідродинамічного моделювання оптимальних розмірів прірви, які у разі ренатуралізації вдсх. Сасик у морський лиман забезпечать необхідну інтенсивність водообміну між лиманом і морем, вирішувалась раніше в роботі [9].

Однак за роки, які пройшли з моменту виходу вищезгаданих робіт, методи чисельного моделювання і моделі гідрофізичних та гідродинамічних процесів зазнали суттєвого розвитку. Ні в яке порівняння не йдуть розрахункові потужності сучасних комп'ютерів, і тих, що були доступні дослідникам на початку 90-х років ХХ ст. Зазнали змін характеристики мінливості гідрометеорологічних процесів та розподіл глибин у водоймі. Тому перевірка, уточнення і доповнення [8, 9] результатами розрахунків, отриманими із застосуванням сучасних чисельних 3-D гідродинамічних моделей, також є актуальною задачею.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для вирішення поставленої задачі застосовувалась чисельна гідротермодинамічна модель Delft3D Flexible Mesh (Delft3D FM) у 3D-варіанті [10]. Модель заснована на чисельному вирішенні тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливої рідини на мілкій воді у наближенні Бусінеска та гідростатики. Система прогностичних диференціальних рівнянь моделі складається з рівнянь руху, рівняння нерозривності, рівнянь транспорту скалярних величин (температури, солоності, індикаторів-трасерів) та замикається двопараметричною $k-\varepsilon$ -моделлю турбулентності.

Для адаптації моделі до умов лиману Сасик була генерована неструктурована криволінійна розрахункова сітка (рис. 2), яка складалась з 4697 розрахункових елементів (4927 вузлів) з перемінними розмірами – від 20 до 500 м. Сітка з достатньою точністю описує основні особливості геоморфологічної будови лиману та містить області телескопізації (1 та 2 на рис. 2) результатів моделювання для коректного врахування вузьких з'єднувальних каналів на акваторії

рії лиману, із збереженням прийняттого часу розрахунків на значних (річних) проміжках часу.

Для завдання в моделі просторового розподілу глибин в лимані Сасик (в метрах Балтійської системи висот та глибин) використовувались дані результатів промірних робіт на акваторії лиману, виконаних у 2009 році. При моделюванні використовувались 10 розрахункових рівнів за вертикаллю у σ -системі координат – кожен товщиною в 10% від повної локальної глибини.

Моделювання з метою верифікації моделі виконувалось за гідрометеорологічних умов 2019 року.

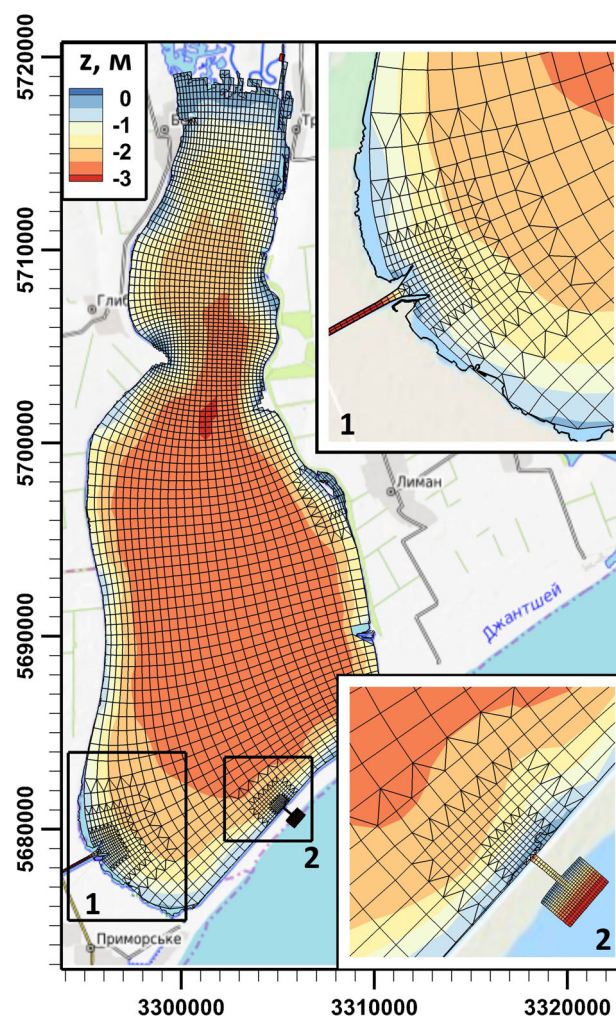


Рис. 2 – Розрахункова сітка, побудована для акваторії лиману Сасик: 1 – діючий канал «Дунай-Сасик»; 2 – з'єднувальний канал «Чорне море-Сасик», що пропонується

Fig. 2 – Computational grid and bathymetry of the Sasyk Lagoon: 1 – channel “Danube-Sasyk” (now operating as a flume); 2 – proposed channel “Black Sea-Sasyk”

При розрахунках, на верхній (з атмосферою) відкритій границі розрахункової області задавались: часова мінливість температури повітря,

напрямку і швидкості вітру, кількості атмосферних опадів за даними спостережень на МГП «Приморське» (3 на рис. 1); відносної вологості повітря та відсотку хмарності неба за даними спостережень на ГМС «Сарата» (6 на рис. 1). На боковій відкритій границі з'єднувального каналу «Дунай-Сасик» (1 на рис. 1) задавались спостережені протягом 2019 р. коливання рівня води в р. Дунай (рис. 3а) та мінливість температури і мінералізації дунайської води, надані Дунайською гідрометеорологічною обсерваторією.

При моделюванні враховувались оцінки середньомісячних витрат стоку в лиман річок Когильник і Сарата за умов маловодного року 75% забезпеченості, розраховані за моделлю «клімат-стік» [11, 12].

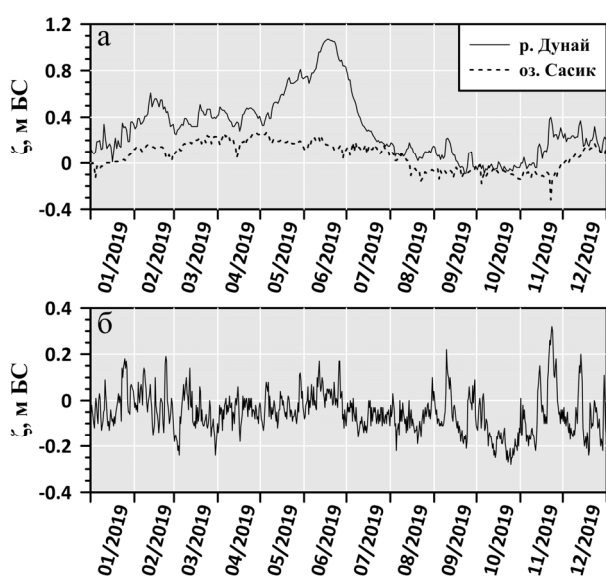


Рис. 3 – Річна мінливість протягом 2019 р. відміток рівня води в р. Дунай, м БС, на відкритій границі каналу «Дунай-Сасик», у вдсх. Сасик біля с. Борисівка (а) та моря за даними МГП «Приморське» (б)

Fig. 3 – Time series of water level measured in 2019: in the Danube River (solid line) and in the Sasyk lagoon (dashed line) (upper panel); sea level at the “Prymorske” (lower panel)

Відмітки дна в каналі «Дунай-Сасик» задавались на основі технічних характеристик каналу, наведених в [13, с. 33-34]. Слід зазначити, що на теперішній час існує деяка невизначеність щодо реальних відміток дна в каналі, викликана відсутністю актуальних даних промірів глибин кана-

лу, який постійно заноситься зваженими наночастинами зі сторони р. Дунай. Режим роботи головного пропускного шлюзу каналу протягом 2019 р. задавався в моделі відповідно до інформації, наданої Кілійським міжрайонним управлінням водного господарства.

Випаровування з водної поверхні лиману розраховувалось в самій моделі з урахуванням мінералізації вод лиману.

Для верифікації модельних розрахунків використовувались добові дані спостережень за рівнем і температурою води поверхневого шару вод в лимані Сасик протягом 2019 р. на гідрологічному посту «Борисівка». Вимірювання солоності води на цьому гідрологічному посту виконувались лише щоквартально. Початковий розподіл температури, солоності і відмітки рівня води у водоймі приймався однорідним у просторі.

3. АДАПТАЦІЯ ГІДРОТЕРМОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ДО УМОВ ЛИМАНУ САСИК ТА ЇЇ ВЕРИФІКАЦІЯ

На першому етапі виконання модельних розрахунків було здійснено адаптацію чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D FM до умов лиману Сасик.

Під час адаптації моделі були проведені модельні розрахунки сталої вітрової циркуляції вод на акваторії лиману. Для калібрування баротропної складової моделі були використані емпіричні залежності розмаху коливань рівня води в лимані від швидкості вітру, наведені в [2] (рис. 4) та [9]. При цьому, основним параметром моделі, який підлягав налаштуванню, було обрано коефіцієнт поверхневого вітрового тертя c_d , який використовується для розрахунку вітрової напруги тертя τ_s на верхній (з атмосферою) відкритій границі розрахункової області [14]:

$$|\tau_s| = \rho_a c_d U_{10}^2, \quad (1)$$

де ρ_a – густина повітря, кг/м^3 ; U_{10} – швидкість вітру на висоті 10 м, м/с; c_d – коефіцієнт поверхневого вітрового тертя, який залежить від U_{10} :

$$c_d(U_{10}) = \begin{cases} c_d^A, & U_{10} \leq U_{10}^A, \\ c_d^A + (c_d^B - c_d^A) \frac{U_{10} - U_{10}^A}{U_{10}^B - U_{10}^A}, & U_{10}^A \leq U_{10} \leq U_{10}^B, \\ c_d^B + (c_d^C - c_d^B) \frac{U_{10} - U_{10}^B}{U_{10}^C - U_{10}^B}, & U_{10}^B \leq U_{10} \leq U_{10}^C, \\ c_d^C, & U_{10}^C \leq U_{10}. \end{cases} \quad (2)$$

Значення коефіцієнтів поверхневого вітрового тертя, встановлені під час калібрування моделі для умов лиману Сасик, приймалися рівними: $c_d^A = 3,8 \times 10^{-3}$, $c_d^B = 1,6 \times 10^{-3}$ та $c_d^C = 1,235 \times 10^{-3}$ при швидкостях вітру 5, 10 та 15 м/с відповідно.

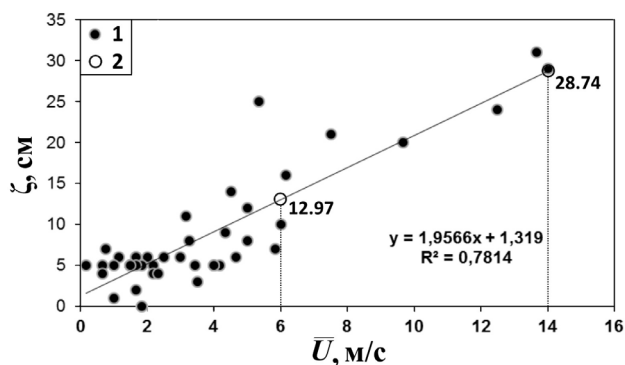


Рис. 4 – Залежність розмаху коливань рівня води ζ , см, від модуля швидкості вітру \bar{U} , м/с, для лиману Сасик за результатами: 1 – спостережень у 2011 р. [2]; 2 – розрахунків за моделлю Delft3D FM при стаціонарному північному вітрі швидкістю 6 та 14 м/с

Fig. 4 – Dependence of water level in the Sasyk Lagoon on wind speed magnitude: 1 – observations made in 2011 [2]; 2 – results of Delft3D FM simulations under stationary northern winds of 6 and 14 m s⁻¹

Моделльні розрахунки проводилось протягом 6 днів модельного часу за умов стаціонарних вітрів різних напрямків швидкістю 6 та 14 м/с. Встановлено, що усталення баротропної циркуляції вод та відхилень рівня води в лимані від стану спокою відбувається протягом перших 12-ти годин (0,5 діб) модельного часу. За умов стаціонарного вітру північного напрямку швидкістю 14 м/с максимальний перепад рівня між північною та південною частинами лиману складає 0,58 м, а за умов південного напрямку тієї ж швидкості – 0,52 м. Ці значення узгоджуються з емпіричною залежністю максимального перепаду рівня між північною і південною частинами

водосховища у разі вітрів північних румбів, наведеною в [9]. Однак, різниця в перепадах рівня води у разі південних і північних вітрів однієї швидкості не така велика, як при використанні залежностей, наведених в [9], що може бути наслідком зміни розподілу глибин у водоймі та гідрологічних умов.

На рис. 5 приведені, як приклад, результати моделювання просторової мінливості рівня води та циркуляції вод в лимані за умов стаціонарних вітрів північного та північно-західного напрямків швидкістю 14 м/с. Видно, що вітрова циркуляція вод в лимані має двошаровий характер у віддаленій від берегів відносно глибокій його частині, і одношаровий – у мілководній зоні вздовж берегу. Основні закономірності формування вітрової циркуляції вод у водоймищі Сасик подібні до визначених в роботах [8, 15], хоча є й особливості, пов'язані з просторовим розподілом глибин, конфігурацією берегів, які були встановлені завдяки застосуванню розрахункової сітки з високою просторовою деталізацією. До таких, наприклад, відноситься значно ширша ніж у [8] баротропна компенсаційна течія, спрямована проти вітру при повздовжніх відносно осі лиману вітрах, і, відповідно, значне звуження циркуляційних вихорів по обидві сторони від її струменя в південній частині лиману.

Верифікація моделі виконувалась за гідрометеорологічних умов 2019 року. В ході калібрування було встановлено, що при завданні кількості атмосферних опадів за даними різних гідрометеорологічних станцій – «Усть-Дунайськ», «Приморське», «Сарата», найбільш достовірні результати моделювання були отримані з використанням даних МГП «Приморське».

Основні параметри моделі Delft3D FM, визначені під час її калібрування для умов 2019 року, зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри моделі Delft3D FM, визначені при калібруванні
Table 1 – Delft3D FM model parameters determined during calibration

№ з/п	Назва параметру моделі	Одиниці виміру	Значення, яке задавалось
1.	Коефіцієнт горизонтальної турбулентної в'язкості	м ² /с	0,1
2.	Коефіцієнт горизонтальної турбулентної дифузії	м ² /с	0,1
3.	Коефіцієнт вертикальної турбулентної в'язкості	м ² /с	$5,0 \times 10^{-5}$
4.	Коефіцієнт вертикальної турбулентної дифузії	м ² /с	$5,0 \times 10^{-5}$
5.	Коефіцієнт Смагоринського для підсіткової моделі турбулентності	-	0,1
6.	Коефіцієнт поверхневого вітрового тертя	-	від $3,80 \times 10^{-3}$ до $1,2350 \times 10^{-3}$
7.	Коефіцієнт донного тертя за Маннінгом	м ^{-1/3} с	від $1,80 \times 10^{-3}$ до $2,30 \times 10^{-3}$
8.	Число Дальтона (випаровування при вимушеній конвекції)	-	$1,60 \times 10^{-3}$
9.	Число Стентона (випаровування при контактному теплообміні з атмосферою)	-	$1,00 \times 10^{-3}$

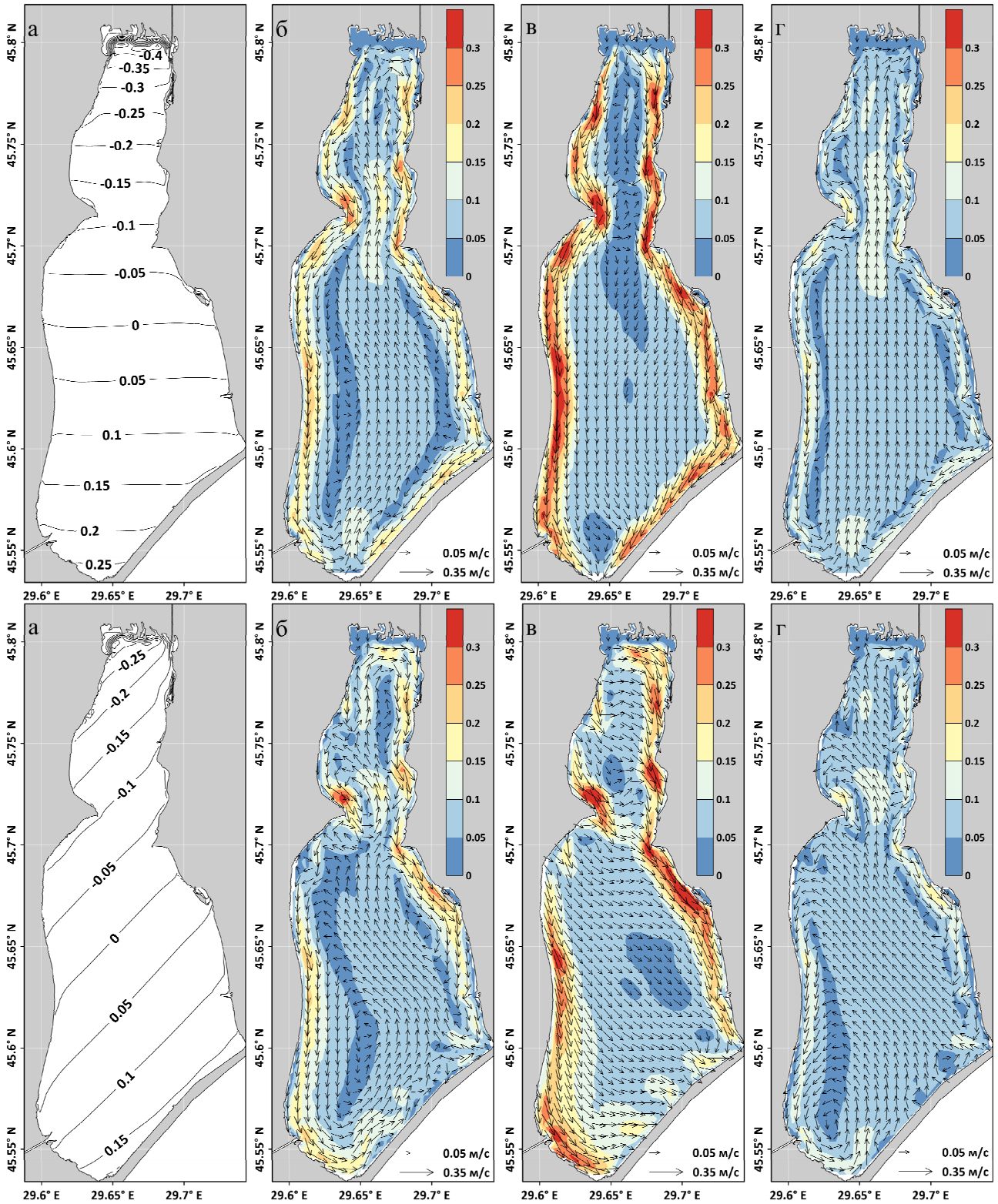


Рис. 5 – Поля відхилень рівня води, м, від незбуреного стану (а), векторів та модулю швидкості осереднених за глибиною (б), поверхневих (в) та придонних (г) течій, м/с, в лимані Сасик при стаціонарних вітрах північного (зверху) та північно-західного (знизу) напрямків швидкістю 14 м/с

Fig. 5 – Spatial distributions of modelled water level (A), depth-averaged (B), surface-level (C) and bottom-level (D) flow velocities in the Sasyk Lagoon for the stationary northern (upper panel) and north-western (lower panel) winds of 14 m s^{-1}

На рис. 6 представлені графіки річної мінливості виміряних та змодельованих гідрологічних характеристик вод лиману Сасик у 2019 р. Незважаючи на деяку переоцінку моделлю максимальних відміток рівня води в період весняної повені (наприкінці квітня-початку травня), загальний хід рівня води в лимані протягом року відтворений моделлю достовірно (рис. 6а). Також добре узгоджуються модельовані і фактичні дані щодо річної мінливості поверхневої температури води в лимані (рис. 6в), що свідчить про коректний розрахунок тепло- та масообміну на верхній відкритій границі лиману в атмосферно-моделі.

Деяко більші розбіжності між модельованими та фактичними даними мають місце для солоності поверхневого шару вод лиману у четвертому кварталі 2019 р. (рис. 6б). Це можна пояснити як недостатнім обсягом наявних даних спостережень (4 виміряних значення солоності на рік), так і похибками, які виникають внаслідок: (1) неточності завдання поточних глибин у з'єднувальному каналі «Дунай-Сасик»; (2) завдання в моделі мінливості метеорологічних параметрів за даними метеостанцій, розташованих на значній (25-30 км) відстані від контрольної точки в лимані; (3) використанням розрахункових, а не фактичних даних щодо річкового стоку з водозбору лиману.

4. МІНЛИВІСТЬ СОЛОНОСТІ ВОД У ВОДОЙМІ ЗА УМОВІ ВІДНОВЛЕННЯ ЇЇ ВОДООБМІНУ З МОРЕМ

Адаптована по умов вдсх. Сасик та верифікована за умов 2019 р. гідротермодинамічна модель Delft3D FM, була використана для попереднього оцінювання характеру коливань солоності води в лимані після відновлення його зв'язку з морем через штучно створений у пересипу сполучний канал «море-лиман» шириною 100 м та глибиною 1,5 м.

Для проведення розрахунків водообміну лиману з морем на криволінійній розрахунковій сітці було згенеровано область підвищеної деталізації, яка включала як з'єднувальний канал, так і частину прилеглої морської акваторії (2 на рис. 2).

В чисельних експериментах з моделлю розглядалися такі варіанти водного менеджменту лиману за гідрометеорологічних умов 2019 р.:

- варіант 1 – надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик» відсутнє,

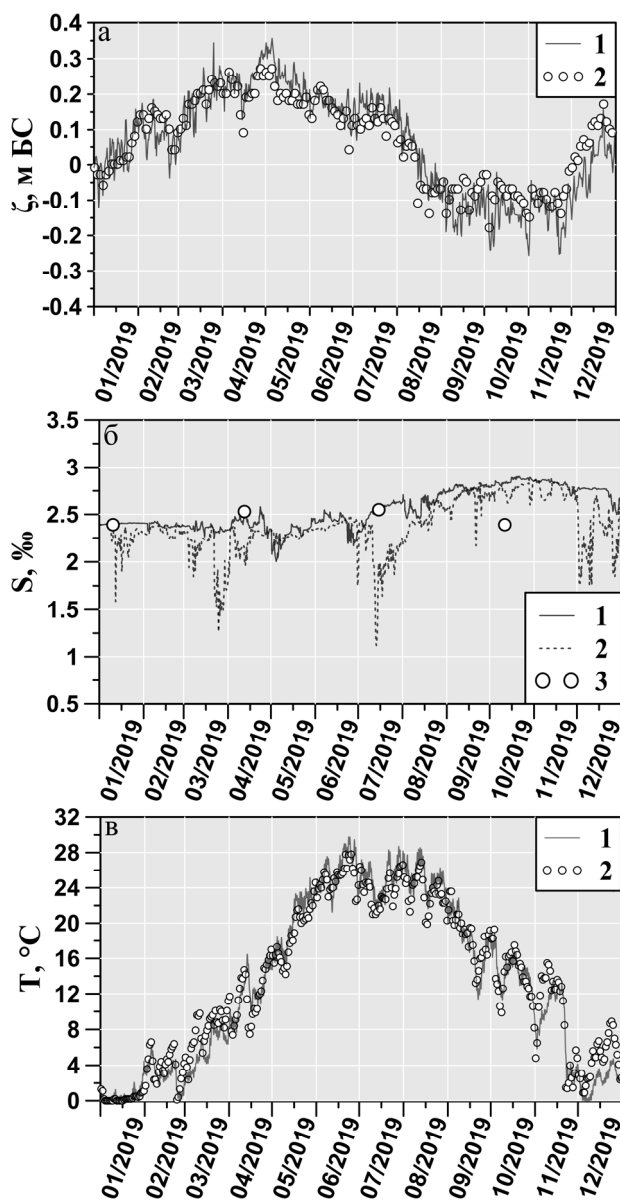


Рис. 6 – Мінливість змодельованих та спостережених гідрологічних характеристик вод вдсх. Сасик у 2019 році: а – рівня води, м БС (1 – за результатами моделювання на ділянці акваторії біля с. Борисівка, 2 – натурні спостереження); б – солоності води, ‰ (1 – за результатами моделювання на ділянці акваторії біля с. Борисівка, 2 – за результатами моделювання у південній частині лиману, 3 – натурні спостереження); в – температури води, °С (1 – за результатами моделювання на ділянці акваторії біля с. Борисівка; 2 – натурні спостереження)

Fig. 6 – Time series of measured and modelled hydrological parameters of the Sasyk Lagoon waters in 2019: A – modelled (solid line) and measured (white dots) water level in the water area near Borysivka village; B – modelled water salinity in the water area near Borysivka village (solid line) and in the southern part of the lagoon (dashed line); observed water salinity (white dots); C – modelled (solid line) and measured (white dots) water temperature in the water area near Borysivka village

а канал «море-лиман» відкритий протягом року;

- варіант 2 – надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик» відсутнє, канал «море-лиман» відкритий протягом року, а початкові умови для розрахунку взяті з останнього моменту часу розрахунку за варіантом 1 (перший рік розрахунків);
- варіант 3 – надходження дунайських вод в лиман через канал «Дунай-Сасик» відбувається протягом травня-липня, канал «море-лиман» відкритий протягом року, а початкові умови для розрахунку брались з останнього моменту часу розрахунку за варіантом 1.

Для всіх варіантів розрахунків на відкритій морській границі з'єднувального каналу «море-лиман» задавались коливання рівня моря (рис. 3б), мінливість солоності та температури морської води за даними спостережень на МГП «Приморське».

Часова мінливість солоності води в південній та північній частинах лиману, отримана при моделюванні вказаних вище варіантів водного менеджменту, показана на рис. 7, 9.

З рис. 7 видно, що у разі функціонування тільки каналу «море-лиман», до кінця першого року моделювання (варіант 1) відбувається підвищення солоності вод в лимані до її значень характерних для морських вод. Протягом другого року моделювання (варіант 2) солоність вод в лимані, починаючи з серпня, перевищує солоність морських вод внаслідок інтенсивного випаровування. На кінець другого року моделю-

вання солоність лиманних вод приблизно на 5 % перевищує солоність морських вод.

Для визначення часу водооновлення лиману Сасик морськими водами, які надходять до нього через з'єднувальний канал, застосовувалась методика апробована в [16]. Як індикатор проникнення морських вод в лиман і ступеня водооновлення ними вод різних частин лиману, розглядалася домішка нейтральної плавучості, концентрація якої в морській воді приймалася рівною 100 умовним одиницям (ум. од.), а в лимані 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, представленій у відсотках. Досягнення верхньої межі в 100 ум. од. відповідає повному водооновленню в розрахунковій точці в результаті надходження морських вод.

Результати розрахунків динаміки об'ємної концентрації морської води в точках, які розташовані в північній і південній частинах лиману, у разі реалізації варіантів 1-2 показані на рис. 8. Вони свідчать, що час повного водооновлення лиману складе 1 рік і 5 місяців. Незважаючи на те, що вся вода в лимані обновляється морською вже до середини 2-го року моделювання (варіант 2), зростання солоності вод в лимані продовжується до кінця року.

Отже, постійне функціонування протягом року з'єднувального каналу «море-лиман» шириною 100 м і глибиною 1,5 м не здатне запобігти

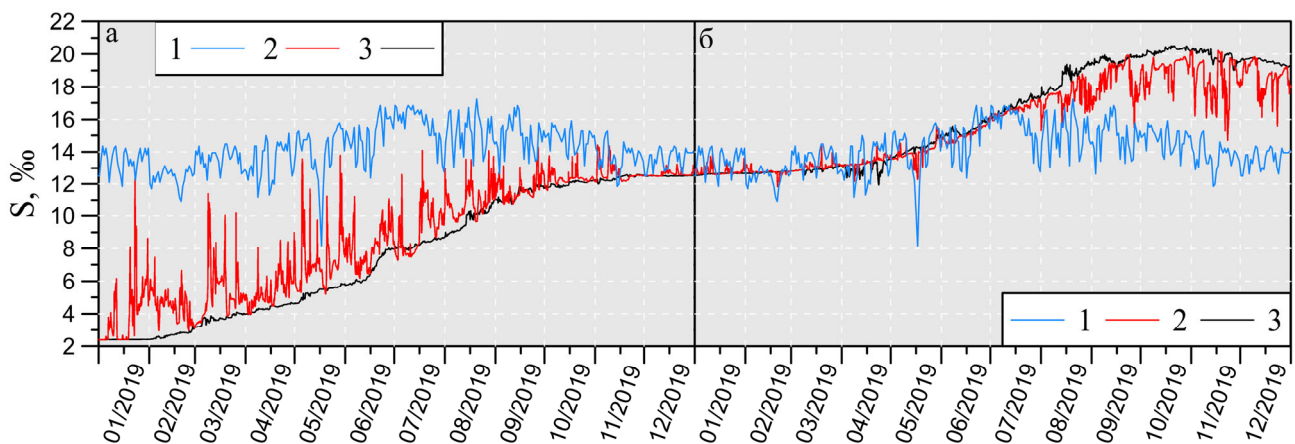


Рис. 7 – Зміни солоності води в лимані Сасик та у морі: а – варіант 1; б – варіант 2 (1 – в морі біля каналу, 2 – точка в південній частині лиману; 3 – точка в північній частині лиману)

Fig. 7 – Time series of modelled water salinity, in ppt, in the Sasyk Lagoon and in the sea: A – variant 1; B – variant 2 (blue line – in the sea near the channel; red line – in the southern part of the lagoon; black line – in the northern part of the lagoon)

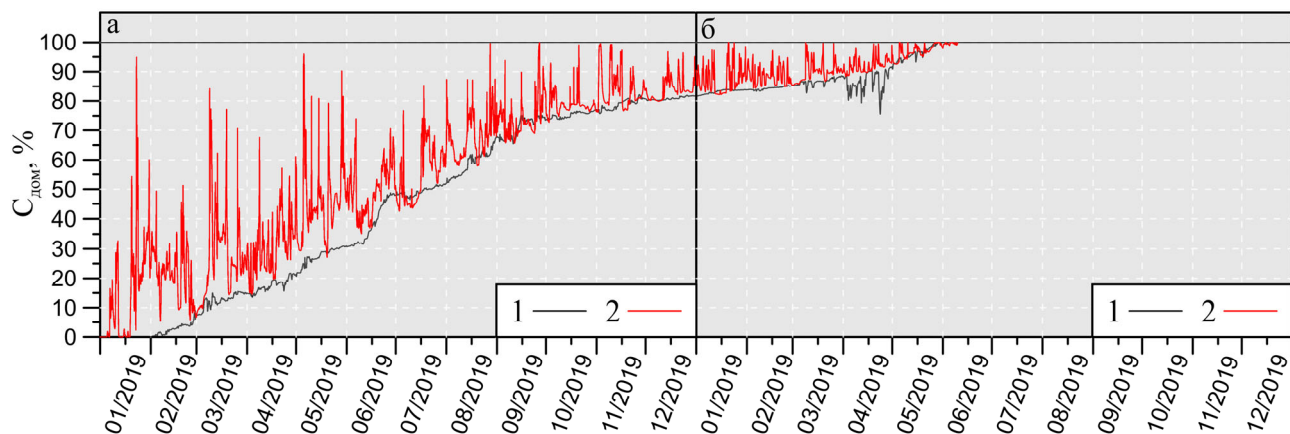


Рис. 8 – Зміни об'ємної концентрації морської води, %, яка поступає до лиману з морськими водами: а – варіант 1; б – варіант 2 (1 – точка в північній частині лиману, 2 – точка в південній частині лиману)

Fig. 8 – Time series of tracer concentration, in per cent, in the Sasyk Lagoon: A – variant 1; B – variant 2 (red line – in the southern part of the lagoon)

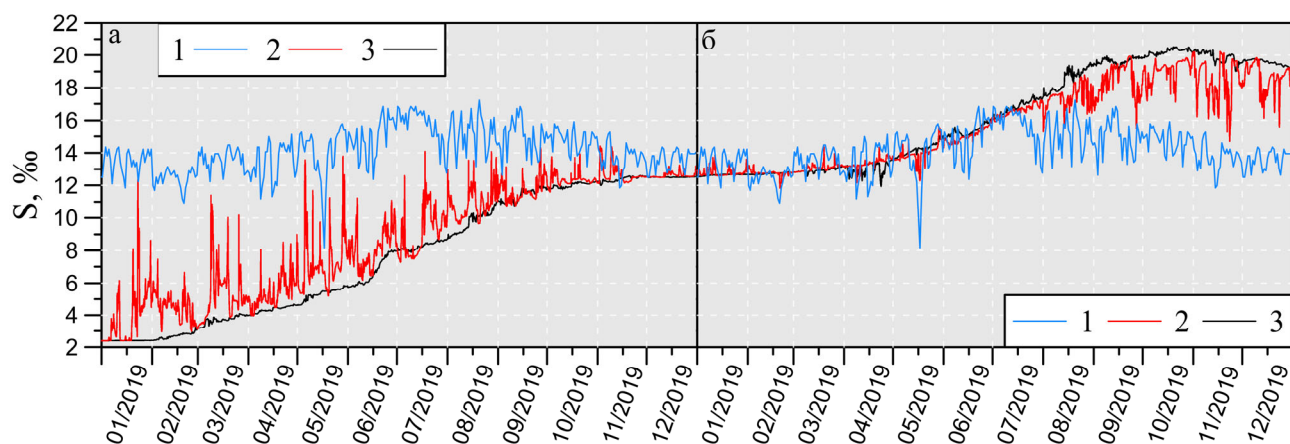


Рис. 9 – Зміни солоності води в лимані Сасик та у морі: а – варіант 1; б – варіант 3 (1 – в морі біля каналу, 2 – точка в південній частині лиману; 3 – точка в північній частині лиману)

Fig. 9 – Time series of modelled water salinity, in ppt, in the Sasyk Lagoon and in the sea: A – variant 1; B – variant 3 (blue line – in the sea near the channel; red line – in the southern part of the lagoon; black line – in the northern part of the lagoon)

засоленню вод лиману у багаторічній перспективі і забезпечити стабілізацію його гідроекологічного режиму. Однак, такі вимоги забезпечуються у разі реалізації варіанту 3 водного менеджменту лиману (рис. 9), коли забезпечується надходження дунайських вод до лиману протягом травня-липня – в період, коли відмітки рівня води в р. Дунай за умов 2019 р. значно перевищували відмітки рівня води в лимані.

Важливим показником зміни характеристик гідрологічного режиму водоймища Сасик в перехідний період його ренатуралізації в морський лиман є мінливість солоності вод. Вважається, що після відновлення водообміну з морем, при підвищенні значень солоності води до 7-8 ‰,

відбудеться масова загибель прісноводних видів флори і фауни і почнеться формування морської екосистеми водоймища [17]. Результати для першого року моделювання (варіант 1), наведені на рис. 7, демонструють, що проміжок часу з моменту початку водообміну з морем, протягом якого буде досягнута ця критична межа солоності, складає для південної частини лиману приблизно 4 місяця, а для північної – 5,5 місяця. Однак, навіть протягом перших 4-х місяців року, солоність вод в південній частині лиману може короточасно зростати до значень, які перевищують критичні 7-8 ‰.

5. ВИСНОВКИ

Результати адаптації до умов водосховища Сасик та верифікації чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D FM свідчать про можливість її застосування для вивчення різних гідрологічних аспектів та наслідків повернення водойми до природного статусу морського лиману шляхом відновлення водообміну з морем.

На підставі результатів сценарного моделювання за гідрометеорологічних умов 2019 р. було встановлено, що у разі припинення надходження до водойми дунайських вод через канал «Дунай-Сасик» та встановлення постійного протягом року водообміну водойми з морем через штучний з'єднувальний канал «море-лиман» шириною 100 м і глибиною 1,5 м, час повного водооновлення лиману складе 1 рік і 5 місяців, але стабілізація солоності вод в лимані не відбудеться, тобто в багаторічній перспективі буде відбуватись засолення вод лиману. Проміжок часу з моменту початку водообміну з морем, протягом якого буде досягнута критична для існування прісноводних видів флори і фауни межа 7-8 ‰ солоності вод в лимані, становить для південної частини лиману приблизно 4 місяці, а для північної – 5,5 місяця. Після цього почнеться формування морської екосистеми водоймища.

Разом з тим, в роботі показано, що стабілізація солоності вод в лимані в другий рік моделювання може бути досягнута у разі забезпечення надходження дунайських вод до лиману протягом періоду, коли відмітки рівня води в р. Дунай значно перевищували відмітки рівня води в лимані (травень-липень 2019 р.).

Перспективи подальших досліджень полягають у визначенні, на підставі результатів чисельного моделювання, ефективності заходів щодо збільшення ширини з'єднувального каналу до 300 м та його поглиблення до 2 м. Як альтернативний варіант – створення 2 штучних каналів шириною 100-150 м на краях пересипу. Важливою також є оцінка інтенсивності розмиву або занесення каналу (каналів) з різними морфометричними характеристиками.

ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку экс-директору Дунайської гідрометеорологічної обсерваторії В. М. Морозову за надані для підготовки статті дані спостережень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розенгурт М. Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов одесских лиманов: монография. Киев: Наукова думка, 1974. 224 с.
2. Иванова Н. О. Динаміка рівня водної поверхні Сасика на різних етапах існування водойми. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2018. №4 (51). С. 63-75.
3. Ляшенко А. В., Зорина-Сахарова Е. Е. Гидроэкологическая характеристика лимана Сасык и Сасыкского водохранилища. *Гідробіологічний журнал*. 2017. 53(1). С. 28-46.
4. Ляшенко А. В., Зорина-Сахарова Е. Е. Гидролого-гидрохимическая характеристика лимана Сасык и Сасыкского водохранилища. *Гідробіологічний журнал*. 2016. 52(6). С. 99-109.
5. Тучковенко Ю. С. Современный гидроэкологический режим водохранилища Сасык и проблемы его реконструкции в морской лиман. Труды международной научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов»: Т.1 «Гидро- и геодинамические процессы», 17-20 мая. Пермь, Россия, 2011. С. 162 – 167. <http://eprints.library.odeku.edu.ua/7776/>
6. Тучковенко Ю. С., Гопченко Є. Д. Аналіз сучасного гідрологічного режиму водосховища Сасик та експертна оцінка очікуваних його змін при реконструкції у морський лиман. *Матеріали звітної науково-технічної конференції науково-педагогічних працівників Одеського державного екологічного університету*, 2-4 лютого. Одеса: ОДЕКУ, 2009. С. 38-40. <http://eprints.library.odeku.edu.ua/5379/>
7. Лозовський П. С. Гідрологічний режим та оцінювання якості води озера-водосховища Сасик у часі. *Часопис картографії*. 2013. Вип. 6. С. 146-170.
8. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья: монография. Киев: Наукова думка, 1990. 240 с.
9. Лонин С. А., Тучковенко Ю. С. Водообмен лимана Сасык и Черного моря. *Водные ресурсы*. 1995. 22(4). С. 107-117. <http://eprints.library.odeku.edu.ua/4526/>
10. Deltares. (2020). *D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 0.9.1, SVN revision: 66806*. Delft, the Netherlands URL: http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (дата звернення: 05.10.2020).
11. Гопченко Е. Д., Лобода Н. С. Водные ресурсы северо-западного Причерноморья (в естественных и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях): монография. Киев: КНТ, 2005. 188 с.
12. Лобода Н. С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния: монография. Одесса: Экология, 2005. 208 с.
13. Математичне моделювання процесів замулення підвідних каналів-ковшів до шлюзів-регуляторів на придунайських озерах: звіт з НДР ДР 0113U005799 (науковий керівник: к.т.н., проф. О.Г. Кулібабін) / Од. держ. екол. ун-т. Одеса, 2017. 152 с.
14. Interactions between Lake-Level Fluctuations and Waterlogging Disasters around a Large-Scale Shallow Lake: An Empirical Analysis from China / Wang, Z., Wang, K., Liu, K. et al. *Water*. 2019. 11(2):318. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/318> (дата

звернення: 05.10.2020).

15. Тучковенко Ю. С., Кушнір Д. В., Грїб О. Н. Моделирование ветровой циркуляции вод и денивеляций уровня в Куяльницьком лимане. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2017. Вип. 22. С. 80-89. <http://eprints.library.odetu.edu.ua/2293/>
 16. Tuchkovenko Y., Tuchkovenko O., Khokhlov V. Modelling water exchange between coastal elongated lagoon and sea: influence of the morphometric characteristics of connecting channel on water renewal in lagoon. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. 5. pp. 37-46. DOI: [10.21303/2461-4262.2019.00979](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00979).
 17. Розробка соціально-економічного та екологічного обґрунтування відновлення гідрологічного режиму озера Сасик: звіт з НДР (науковий керівник: к.б.н. О.Г. Васенко) / Український науково-дослідний інститут екологічних проблем. Харків. 2004. 215 с.
- REFERENCES**
1. Rozengurt, M.Sh. (1974). *Gidrologiya i perspektivy rekonstruksii prirodnykh resursov odesskikh limanov [Hydrology and prospects for the reconstruction of natural resources of the Odessa lagoons]*. Kiev: Naukova dumka. (in Russ.)
 2. Ivanova, N.O. (2018). [The dynamics of the level of the water surface of Sasyk at different stages of the existence of the reservoir]. *Hidrologiia, hidrokimiia i hidroekologiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 4(51), pp. 63-75. (in Ukr.)
 3. Lyashenko, A.V. & Zorina-Sakharova, E.E. (2017). Gidroekologicheskaya kharakteristika limana Sasyk i Sasykskogo vodokhranilishcha [Hydroecological characteristics of the Sasyk Lagoon and the Sasyk reservoir]. *Gidrobiologichnyy zhurnal [Hydrobiological Journal]*, 53 (1), pp. 28-46. (in Russ.)
 4. Lyashenko, A.V. & Zorina-Sakharova, E.E. (2016). Gidrologo-gidrokhimicheskaya kharakteristika limana Sasyk i Sasykskogo vodokhranilishcha. [Hydroecological and hydrochemical characteristics of the Sasyk Lagoon and the Sasyk reservoir]. *Gidrobiologichnyy zhurnal [Hydrobiological Journal]*, 52 (6), pp. 99-109. (in Russ.)
 5. Tuchkovenko, Yu.S. (2011). [The modern hydroecological regime of the Sasyk reservoir and the problems of its reconstruction into the coastal lagoon]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov»: T.1 «Gidro- i geodinamicheskie protsessy» [Proceedings of international scientific and practical Conference "Contemporary problems of reservoirs and their catchments": Vol. 1 "Hydro- and geodynamic processes"]*, 17-20 May. Perm, Russia, pp.162–167. (in Russ.)
 6. Tuchkovenko, Yu.S. & Hopchenko, Ye.D. (2009) [Analysis of the current hydrological regime of the Sasyk Reservoir and expert assessment of its expected changes during the reconstruction into the coastal lagoon]. *Materialy zvitnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii naukovo-pedahohichnykh pratsivnykhiv Odeskoho derzhavnoho ekolohichnoho universytetu [Proceedings of the reporting scientific and technical Conference of scientific and pedagogical workers of Odessa State Environmental University]*, 2-4 February. Odesa, pp. 38-40. (in Ukr.)
 7. Lozovitskyi, P.S. (2013). [Hydrology regime and water quality estimation of lake-reservoir Sasyk in time]. *Chasopys kartohrafii [Magazine of Cartography]*, 6, pp. 146-170. (in Ukr.)
 8. Timchenko, V.M. (1990). *Ekologo-gidrologicheskie issledovaniya vodoemov Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya [Ecological and hydrological studies of water bodies in the north-western Black Sea region]*. Kiev: Naukova dumka. (in Ukr.)
 9. Lonin, S.A. & Tuchkovenko, Yu.S. (1995). Vodoobmen limana Sasyk i Chernogo morya [Water exchange of the Sasyk Lagoon and the Black Sea]. *Vodnye resursy [Water Resources]*, 22(4), pp. 107-117. (in Russ.)
 10. Deltares. (2020). *D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 0.9.1, SVN revision: 66806*. Delft, the Netherlands. Available at: http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (accessed: 05.10.2020).
 11. Gopchenko, E.D. & Loboda, N.S. (2005). *Vodnye resursy severo-zapadnogo Prichernomor'ya (v estestvennykh i narushennykh khozyaystvennoy deyatel'nost'yu usloviyakh) [Water resources of the northwestern Black Sea region (in natural and disturbed economic conditions)]*. Kiev: KNT. (in Russ.)
 12. Loboda, N.S. (2005). *Raschety i obobshcheniya kharakteristik godovogo stoka rek Ukrainy v usloviyakh antropogennogo vliyaniya [Calculations and generalizations of the characteristics of the annual runoff of Ukrainian rivers under conditions of anthropogenic influence]*. Odessa: Ekologiya. (in Russ.)
 13. Odessa State Environmental University. (2017). Scientific Report DR 0113U005799: *Matematychno modeliuвання protsesiv zamulennia pidvidnykh kanaliv-kovshiv do shliuziv-rehulatoriv na pryduнайskykh ozerakh [Mathematical modeling of siltation processes in underwater inlet channels-collectors up to sluices-regulators on the Danubian lakes]*. Odesa. (in Ukr.)
 14. Wang, Z., Wang, K., Liu, K. et al. (2019). Interactions between Lake-Level Fluctuations and Waterlogging Disasters around a Large-Scale Shallow Lake: An Empirical Analysis from China. *Water*, 11(2):318. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/318> (accessed: 05.10.2020).
 15. Tuchkovenko, Yu.S., Kushnir, D.V. & Grib, O.N. (2017). [Modelling of wind-induced circulation of water and water level denivellation in the Kuialnytskyi Lyman Lagoon]. *Visnik Odes'kogo derzhavnoho ekolohichnoho universytetu [Bulletin of Odessa state environmental university]*, 22, pp. 80-89. (in Ukr.)
 16. Tuchkovenko, Y., Tuchkovenko, O. & Khokhlov, V. (2019). Modelling water exchange between coastal elongated lagoon and sea: influence of the morphometric characteristics of connecting channel on water renewal in lagoon. *EUREKA: Physics and Engineering*, 5, pp. 37-46. DOI: [10.21303/2461-4262.2019.00979](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00979).
 17. Ukrainian Research Institute of Environmental Problems. (2017). Scientific Report. *Rozrobka sotsialno-ekonomichnoho ta ekolohichnoho obgruntuвання vidnovlennia hidrolohichnoho rezhymu ozera Sasyk [Development of socio-economic and ecological justification for the restoration of the hydrological regime of Lake Sasyk]*. Kharkiv. (in Ukr.)

MODELLING THE VARIABILITY OF HYDROLOGICAL PARAMETERS OF THE SASYK RESERVOIR IMPOUNDMENT UNDER VARIOUS OPTIONS OF ITS OPERATION

D.V. Kushnir, Yu.S. Tuchkovenko

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

This paper highlights the results of adaptation and verification of the Delft3D Flexible Mesh numerical model under the conditions of the Sasyk reservoir. The objective of this work is to evaluate the expected spatio-temporal variability of water salinity in the Sasyk reservoir after completion of the Sasyk renaturalization project by means of establishing a constant water exchange with the sea through the artificial channel.

The Sasyk Lagoon was separated from the sea and transformed into a freshwater reservoir in the late 1970s. However, due to the poor water quality in the Sasyk reservoir in the modern period, the solution of the problem of transforming the reservoir to its original coastal conditions, i.e. the renaturalization, has acquired particular importance.

Model results, obtained under conditions of 2019, indicate the possibility of using a hydrodynamic model to evaluate the effectiveness and possible consequences of various scenario-based decisions to be implemented for the management of the hydrological regime of the reservoir under various options of its operation.

The model runs were used to evaluate the flushing time of the Sasyk Lagoon and the pattern of the salinity fluctuations in the reservoir after the restoration of the artificial channel in the sand bar with a width of 100 m and a depth of 1.5 m and the establishment of the constant “sea-lagoon” interconnection. Applying the hydrometeorological conditions of 2019, a scenario-based modelling for two consecutive years was performed. For the first year of the simulation, a variant of water management under the absence of freshwater inflow from the Danube and the presence of sea water inflow throughout the year was considered. The model results at the end of the first year of the simulation were set as the initial conditions for the second year, and the rest of the external forcing remained unchanged. Additionally, the variant considering the Danube discharge into the lagoon during May-July for the second year of simulation was investigated.

Based on the simulation results, it was found that in the case of a constant water exchange with the sea through the connecting “sea-lagoon” channel (with the abovementioned morphometric characteristics) and under the absence of the Danube freshwater inflow throughout the year: 1) the flushing time of the lagoon will be 1 year and 5 months; 2) stabilization of water salinity in the lagoon will not occur, i.e. the salinization of the lagoon water takes place in the long-term perspective; 3) the time period from the moment of initiating the water exchange with the sea, during which the lagoon reaches the water salinity limit of 7-8 ‰, that is critical for the existence of freshwater species of flora and fauna, is expected to amount to 4 months for the southern part and to 5.5 months for the northern part of the lagoon; after which the formation of the marine ecosystem of the reservoir will begin.

It is shown that the stabilization of water salinity in the lagoon in the second year of the simulation can be achieved under conditions of ensuring the Danubian freshwater discharge in the period of significantly higher water level in the Danube River, compared to the lagoon water level (May-July 2019).

Keywords: Sasyk Lagoon, renaturalization, hydrological parameters, modelling, verification, water exchange with the sea

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОЕМА САСЫК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Д. В. Кушнір, Ю. С. Тучковенко

*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина,
dkush@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

В работе освещены результаты адаптации к условиям водоема Сасык и верификации численной гидротермодинамической модели Delft3D Flexible Mesh, а также применение этой модели для оценки ожидаемой пространственно-временной изменчивости солености

вод в водоеме после его ренатурализации в морской лиман путем установления постоянного водообмена лимана с морем через искусственный соединительный канал.

В конце 70-х годов XX века морской лиман Сасык был отделен от моря и преобразован в пресноводное водохранилище. Однако, из-за низких показателей качества вод водохранилища в современный период, особую актуальность приобрело решение задачи возвращения водоему первоначального статуса морского лимана, то есть его ренатурализации.

Полученные результаты моделирования изменчивости гидрологических характеристик водохранилища Сасык при условиях 2019 года свидетельствуют о возможности применения гидротермодинамической модели для оценки эффективности и возможных последствий принятия различных сценарных решений по управлению гидрологическим режимом водоема при различных вариантах его эксплуатации.

Модель Delft3D FM была использована для оценки времени водообновления лимана Сасык морскими водами, а также характера колебаний солености его вод после восстановления связи с морем через искусственно созданный в пересыпи соединительный канал «море-лиман» шириной 100 м и глубиной 1,5 м. Сценарное моделирование выполнялось при гидрометеорологических условиях 2019 года для двух последовательных лет. В первый год моделирования рассматривался вариант водного менеджмента, когда поступление дунайских вод в лиман через канал «Дунай-Сасык» отсутствует, а канал «море-лиман» открыт на протяжении года. Во второй год моделирования, в качестве начальных условий принимались результаты расчетов на конец первого года, но внешнее воздействие в модели оставалось неизменным. Для второго года расчетов дополнительно рассматривался вариант поступления дунайских вод в лиман через канал «Дунай-Сасык» в мае-июле.

По результатам моделирования установлено, что в случае обеспечения на протяжении года постоянного водообмена лимана с морем через соединительный канал «море-лиман» (с указанными морфометрическими характеристиками) и в отсутствии поступления дунайских вод в лиман через канал «Дунай-Сасык»: 1) время полного водообновления лимана составит 1 год и 5 месяцев; 2) стабилизация солености вод в лимане не произойдет, т. е. в многолетней перспективе будет происходить засоление вод лимана; 3) промежуток времени с момента начала водообмена с морем, на протяжении которого будет достигнута критическая для существования пресноводных видов флоры и фауны граница солености вод лимана в 7-8 ‰, составляет для южной части лимана приблизительно 4 месяца, а для северной – 5,5 месяцев; после чего начнется формирование морской экосистемы водоема.

Показано, что стабилизация солености вод в лимане во второй год моделирования может быть достигнута в случае обеспечения поступления в лиман дунайских вод в период, когда отметки уровня воды в р. Дунай значительно превышали отметки уровня воды в лимане (май-июль 2019 г.).

Ключевые слова: лиман Сасык, ренатурализация, гидрологические характеристики, моделирование, верификация, водообмен с морем.

*Подання до редакції : 23. 11. 2020
Надходження остаточної версії : 06. 12. 2020
Публікація статті : 17. 12. 2020*