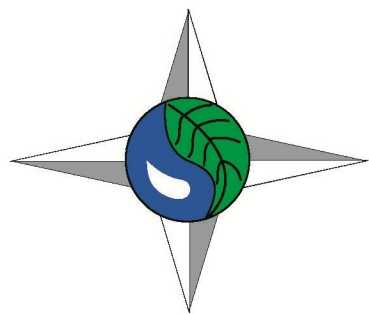




ISSN 2311-0902 (print)  
ISSN 2616-7271 (online)

**Номер 25**  
*Issue 25*

**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  
ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ  
ЖУРНАЛ**

***Ukrains'kij Gidrometeorologičnij Žurnal***

***Ukrainian Hydrometeorological journal***

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

*Scientific Journal*

Друкується 2 рази на рік

*Issued: 2 times a year*

**Заснований у 2005 р.**

*Founded in 2005 y.*

**№ 25, 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, Агрометеорологія

**Члени редакційної колегії**

**А. А. Бакланов**, д-р фіз.-мат. наук, проф. метеорології,  
геофізики, ст. наук. співроб. Датського метеорологічного інституту;  
асоційований проф. Інституту Нільса Бора Копенгагенського  
університету (Данія); **М. А. Берлінський**, д-р геогр. наук, проф.,  
зав. кафедри океанології та морського природокористування  
ОДЕКУ; **В. В. Гребін**, д-р геогр. наук, проф. кафедри гідрології  
та гідроекології Київського національного університету ім. Тараса  
Шевченка; **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); **С. В. Іванов**, д-р геогр.  
наук, старш. наук. співроб., пров. наук. співроб. науково-дослідної  
частини ОДЕКУ; **М. І. Кульбіда**, канд. геогр. наук, директор  
Українського гідрометеорологічного центру, м. Київ;  
**О. Макаріньський**, PhD в географії, пров. наук. співроб.,  
Австралійський інститут морських наук, дослідницький центр  
"Арафура-Тімор" (Австралія); **Д. Макаріньська**, 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  
агрометеорології та агроєкології ОДЕКУ; **С. М. Степаненко**, д-р  
фіз.-мат. наук, проф., ректор ОДЕКУ; **Ж. Р. Шахїрзанова**, д-р  
геогр. наук, проф., зав. кафедри гідрології суші ОДЕКУ.

**Відповідальний секретар**

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

**Editor-in-Chief**

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

**Deputies of Editor-in-Chief**

**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; **Sergiy V. Ivanov**, D. Sc. in  
Geography, Senior Researcher, Lead Researcher of the Research  
Division of OSENU, 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.

"Український гідрометеорологічний журнал" є спеціалізованим науковим виданням, в якому публікуються результати фундаментальних та прикладних наукових досліджень у напрямках "Гідрометеорологія" (метеорологія і кліматологія; агрометеорологія; гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія; океанологія) 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.



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

## ЗМІСТ

## CONTENTS

### Метеорологія і кліматологія

- Зазимко Р. В., Романенко С. Е., Рубан І. Г., Іванов С. В., Тучковенко Ю. С., Дерик О. В. Моделювання з високим розділенням складних вітрових умов над північно-західною частиною Чорного моря
- Замфірова М. С., Хохлов В. М. Режим температури повітря та опадів в Україні в 2021-2050 роках за даними ансамблю моделей CORDEX
- Мищенко Н. М., Панова Я. Л., Грушевський О. М. Нижньорівнева адвекція вологи як тригерний механізм атмосферної конвекції та предиктор її прогнозу
- Писаренко Л. А., Краковська С. В. Основні напрямки сучасних досліджень взаємодії клімату і підстильної поверхні
- Савенець М. В., Дворецька І. В., Уманець А. П., Гречана Н. В. Стан озонного шару та рівня ультрафіолетового опромінення над територією України у 2019 році

### Агrometeorologія

- Данілова Н. В. Вплив зміни клімату на урожайність проса в лісостепу України
- Ільїна А. О. Морфологічні особливості формування пагону вівса посівного (*Avena Sativa* L.) в умовах півдня України

### Гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія

- Лобода Н. С., Катинська І. В. Визначення антропогенних навантажень та екологічних ризиків в басейні р. Кривий Торець (за програмою підтримки ЄС водної політики України)
- Лобода Н. С., Козлов М. О. Оцінка водних ресурсів річок України за середніми статистичними моделями траєкторій змін клімату RCP4.5 та RCP8.5 у період 2021-2050 роки

### Океанологія

- Тучковенко Ю. С., Матигін О. С., Чепурна В. Ю. Прогнозування штормових відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Одеського району північно-західної частини Чорного моря

### Meteorology and Climatology

- 5 Zazimko R. V., Romanenko S. E., Ruban I. G., Ivanov S. V., Tuchkovenko Yu. S., Derik O. V. High resolution modelling of severe wind patterns over the nord-west Black Sea Region
- 17 Zamfirova M. S., Khokhlov V. M. Air temperature and precipitation regime in Ukraine in 2021-2050 by CORDEX models ensemble
- 28 Mishchenko N. M., Panova Y. L., Hrushevskyi O. M. Low-level moisture advection as a trigger mechanism for atmospheric convection and a predictor of its forecast
- 38 Pysarenko L. A., Krakovska S. V. Main directions in modern research of interaction between climate and land-use / land-cover changes
- 53 Savenets M. V., Dvoretzka I. V., Umanets A. P., Grechana N. V. Ozone layer state and level of ultraviolet irradiance on the territory of Ukraine in 2019

### Agriculture Meteorology

- 63 Danilova N. V. Climate change impact on millet productivity in the forest-steppe zone of Ukraine
- 74 Ilina A. A. Morphological features of oat (*Avena Sativa* L.) shoots formation in the southern part of Ukraine

### Hydrology, Water Resources, Hydrochemistry

- 81 Loboda N. S., Katynska I. V. Determination of main anthropogenic impacts and environmental risks for the Kryvyi Torets river basin (based on the EU Support Program for Ukrainian water policy)
- 93 Loboda N. S., Kozlov M. O. Assessment of water resources of the Ukrainian rivers according to the average statistical models of climate change trajectories RCP4.5 and RCP8.5 over the period of 2021 to 2050

### Oceanography

- 105 Tuchkovenko Yu. S., Matygin O. S., Chepurna V. Yu. Forecasting sea level fluctuations caused by storm winds at the ports in Odesa Region of the north-western part of the Black Sea

**Конструктивна географія і раціональне  
використання природних ресурсів**

**Constructive Geography and  
Rational Use of Natural Resources**

- Сафранов Т. А., Шаніна Т. П., Приходько В. Ю.* 115 *Safranov T. A., Shanina T. P., Prykhodko V. Yu.* Current state and possibilities for oversized municipal waste management in the regions of Ukraine
- Тучковенко Ю. С., Сапко О. Ю., Тучковенко О. А.* 127 *Tuchkovenko Yu. S., Sapko O. Yu., Tuchkovenko O. A.* Description of biological wastewater treatment plants of city of Odesa as sources of marine environment nutrient pollution in current period

УДК 551.46.0:551.465

## МОДЕЛЮВАННЯ З ВИСОКИМ РОЗДІЛЕННЯМ СКЛАДНИХ ВІТРОВИХ УМОВ НАД ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЮ ЧАСТИНОЮ ЧОРНОГО МОРЯ

**Р. В. Зазимко, С. Е. Романенко, І. Г. Рубан,  
С. В. Іванов, Ю. С. Тучковенко, О. В. Дерик**

*Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,  
[science@odeku.edu.ua](mailto:science@odeku.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

Досліджено можливості конвективно-роздільної моделі Harmonie при відтворенні мезомасштабних особливостей вітрового режиму над північно-західною частиною Чорного моря. Встановлено оптимальні розміри, проекція та геометрія області високого просторового розділення моделі над українською частиною акваторії Чорного моря, підготовлений цифровий формат берегової лінії відповідного розділення та проведені експерименти щодо інформативності та стійкості розрахунків.

Результати модельних розрахунків показали, що модель з просторовим кроком 2.5 км та кроком за часом 60 сек дає можливість детально відтворювати всю просторову мінливість вітрових умов до зазначеного масштабу та її еволюцію. Зокрема, виділяти окремі мезомасштабні, порядку десяти км, циркуляційні структури над однорідною морською поверхнею та відстежувати їх еволюцію; встановлювати положення смуг конвергенції в умовах збіжності потоків; відзначати просторові характеристики вздовж берега підвітряних смуг послаблення вітру за умов, якщо вітер дме від берега; деталізувати опис полів вітру в затоках і при складній конфігурації берегової смуги з урахуванням орографії; відтворювати послаблення вітру над областю міської забудови за рахунок збільшення шорсткості поверхні.

Порівняльний аналіз розрахункових полів вітру за моделями Harmonie і GFS (Global Forecast System) показав, що остання модель, маючи просторову роздільну здатність 25 км, в змозі адекватно відтворювати тільки великомасштабні атмосферні процеси над регіоном. Однак, при різкій зміні циркуляції, що супроводжується зміною напрямку вітру на протилежний та посиленням вітру, зазначається запізнення опису еволюції полів вітру. Крім того, модель GFS, внаслідок грубої просторової роздільної здатності, не в змозі враховувати мезомасштабні особливості атмосферної циркуляції, обумовлені відмінностями в типах підстильної поверхні, орографією, термічними контрастами і т.п. Порівняння модельних розрахунків зі спостереженнями на станціях Одеса-порт, Чорноморськ і порт Південний у період складних погодних умов показало, що осереднена за весь період розбіжність між модельними результатами та спостереженнями входить в допустимий інтервал помилки прогнозу (5 м/с) тільки для станції Одеса-порт за моделлю Harmonie. При помірних вітрах з боку берега розбіжність між модельними результатами і спостереженнями незначно (до 5-7 м/с) перевищує допустимий інтервал помилки прогнозу, тоді як при сильних вітрах східних румбів з боку моря розбіжність між модельними результатами та спостереженнями досягає катастрофічних значень у 20-25 м/с. Такі значення розбіжностей обумовлені, головним чином, розбіжностями у визначенні напрямку (до 180°) та швидкості вітру. Результати порівняння однозначно вказують на сумнівну репрезентативність спостережень вітру на станціях Чорноморськ та порт Південний, взагалі, а на станції Одеса-порт – частково.

Результати наведені в роботі свідчать, що застосування атмосферної мезомасштабної моделі високої роздільної здатності для прогнозування вітрових умов в північно-західній частині Чорного моря дозволить значно підвищити якість оперативних прогнозів мінливості океанографічних характеристик в прибережних зонах моря.

**Ключові слова:** конвективно-роздільна модель Harmonie, північно-західна частина Чорного моря, поле вітру.

### 1. ВСТУП

З 80-х років минулого століття оперативні прогнози стану атмосфери виконуються виклю-

чно з використанням чисельних моделей. В останні роки вони набули особливо інтенсивного розвитку. За цей період досягнуто незаперечні успіхи в прогнозуванні великомасштабної

циркуляції атмосфери. В порядку денному стоїть вдосконалення чисельного опису мезомасштабних особливостей. В центрі уваги знаходяться проблеми параметризації фізичних процесів та асиміляції даних спостережень. До перших відноситься удосконалення існуючих і розробка нових схем параметризації розвитку конвекції [1-3], радіаційних процесів [4], включно з розповсюдженням, розсіюванням та поглиненням короткохвильової сонячної радіації у неоднорідній за складом атмосфері та довгохвильовим випромінюванням з поверхні землі та хмарних прошарків, а також розвитком турбулентності у граничному шарі атмосфери та вертикальної турбулентної дифузії у вільній атмосфері [5, 6]. Потреба у розвитку нових методів асиміляції даних пов'язана зі стрибком у розвитку інструментальної бази на існуючих і нових платформах. Сучасні оперативні регіональні моделі атмосфери можуть використовувати високе просторове розділення з адаптованими схемами параметризації фізичних процесів. Серед таких моделей слід зазначити GME / COSMO [6-8], IFS / HIRLAM-HARMONIE [9], глобальну / регіональну конфігурацію UKMO [10, 11], GEM / GEM-LAM [12, 13]. Результати досліджень в цьому напрямку для Чорного моря, з використанням моделі WRF, представлені в [14, 15].

У Європейському центрі Середньострокових Прогнозів Погоди (*ECMWF*) розроблена чисельна схема дискретизації рівнянь руху на основі напівлагранжевої (*semi-Lagrangian, SL*) схеми адвекції на *cimici A* та напівявної дворівневої за часом (*semi-Implicit two-time-level, SI 2TL*) схеми зі спектральним поданням основних прогностичних змінних з використанням двовимірного перетворення Фур'є [5, 16]. Такий принципово новий підхід привів до більш реального опису глобального атмосферного потоку та мезомасштабних особливостей в областях нелінійних взаємодій. Зокрема, зменшена помилка прогнозів за рахунок більш точного опису у нових схемах горизонтальної дифузії та вертикальної нелінійної дифузії в атмосфері. Розроблені схеми параметризації для короткохвильової радіації з шістьма спектральними інтервалами та довгохвильової радіації – з 16-ма спектральними смугами [17]. Базові розробки *ECMWF* для глобальної атмосферної моделі перенесені та адаптовані для мезомасштабної моделі *HARMONIE-AROME*, яка дозволяє моделювати конвективні процеси в явному виді [18].

*Мета цієї роботи* полягає у викладенні та обговоренні результатів адаптації конвективно-роздільної моделі *HARMONIE-AROME* для від-

творення поля вітру у приводному шарі атмосфери прибережних ділянок північно-західній акваторії Чорного моря.

## 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИХІДНІ ДАНІ

Для моделювання структури поля вітру над північно-західною частиною Чорного моря був обраний період з 9 по 16 жовтня 2016 р. В цей час спостерігався вихід Скандинавського циклону, який супроводжувався різкими змінами вітрових умов (рис.1). Спочатку, 10 жовтня акваторія Причорномор'я, знаходилася під впливом холодного фронту. Перед проходженням фронту фіксувався слабкий вітер змінних напрямків. Під час проходження фронту вітер зберігав південний або південно-західний напрямок і швидкість до 5 м/с. Потім, до 11 жовтня погода над акваторією визначалась південно-західною периферією антициклону зі східним вітром до 5 м/с та незначними опадами від 0,6 до 5,0 мм. До 12 жовтня північна частина Причорномор'я опинилась під впливом теплої ділянки фронтального розділу, а центральна частина – під впливом теплового фронту. На всій акваторії спостерігалися південно-східний вітер зі швидкістю до 15 м/с та сильні опади і грози. 13 жовтня регіон опинився під впливом холодного фронту в північній частині фронтальної області, де спостерігався південно-східний вітер зі швидкістю до 13 м/с. У подальшому, 15 та 16 жовтня регіон знаходився під впливом холодного фронту зі слабкими вітрами змінних напрямків.

Для представленого періоду нагінного вітру виконувалося моделювання атмосферної циркуляції за чисельною мезомасштабною моделлю *Harmonie*. Область моделювання покривала всю північно-західну частину Чорного моря та прилеглі території суші. Розмір області складав 200 вузлів за довготою та 100 вузлів за широтою з кроком 2.5 км, тобто 500 x 250 км. Крок за часом складав 60 секунд. Використовувалась стандартна конфігурація моделі для оперативних розрахунків. Вона включає наступні компоненти:

- генерацію кліматичних полів і цифрове представлення топографії модельної області з високим розділенням;
- створення початкових і кінцевих умов з використанням *gl*-інтерполяції, яка враховує тип проєкції (Ламберта, Меркатора, полярно-стереографічна, широтно-довготна) та можливість повороту області;

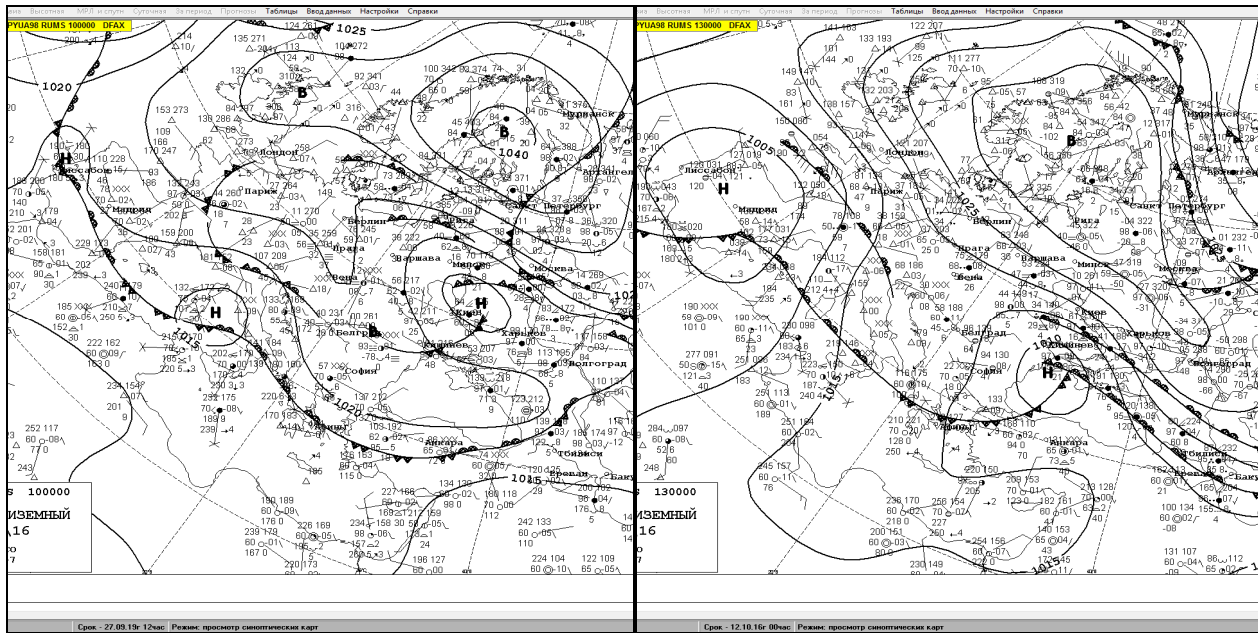


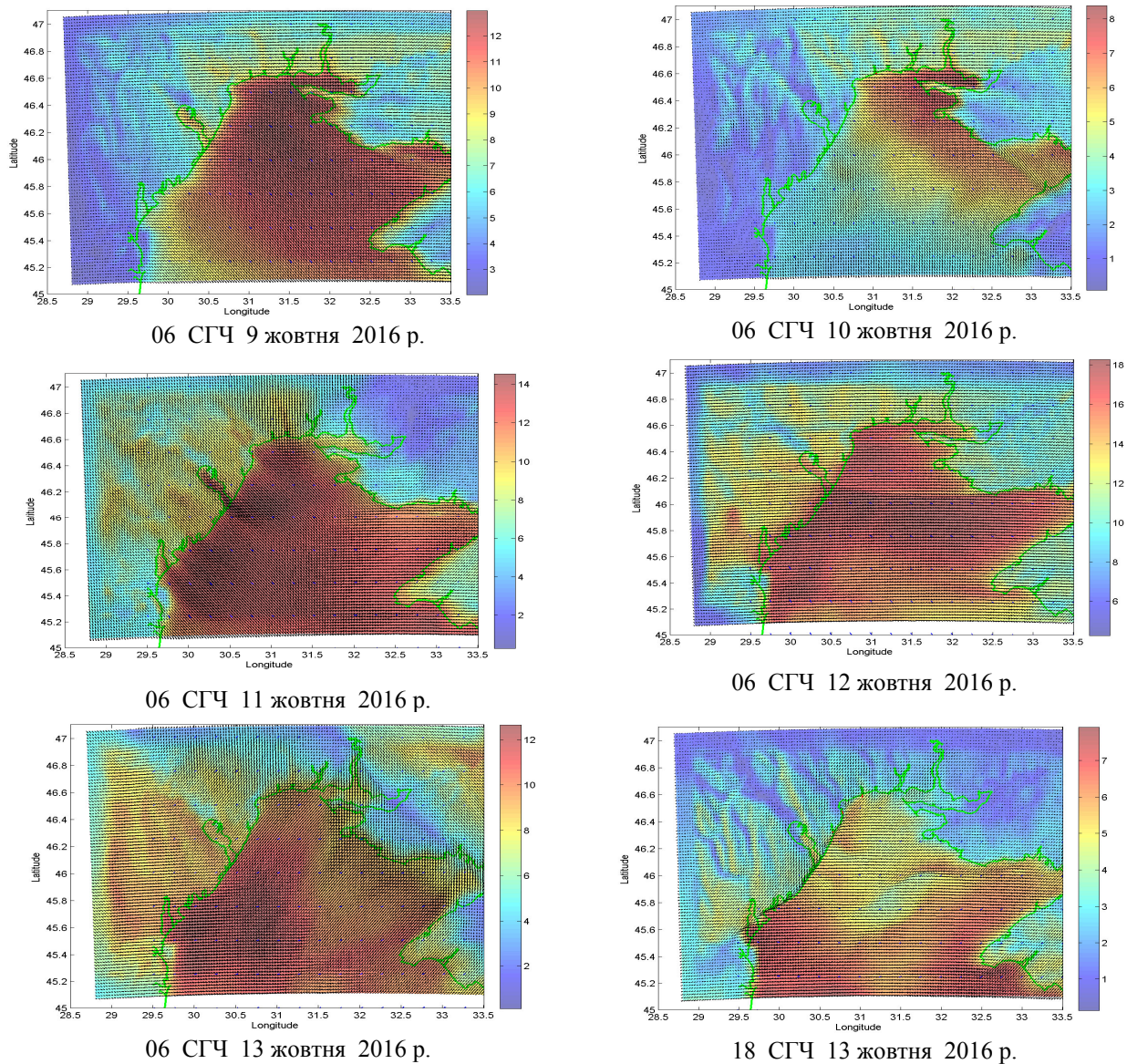
Рис. 1 – Карта приземного аналізу за 00 СГЧ а) 10 жовтня 2016 р.; б) 13 жовтня 2016 р.

- попередню обробку спостережень, яка включає: (а) селекцію всіх доступних за модельною областю спостережень за типами та формуванням “чорного списку”, (б) створення єдиної бази даних спостережень (Observation Data Base, ODB) для вибраної області та періоду;
- системи асиміляції даних: (а) для атмосферних спостережень поблизу підстильної поверхні; (б) тривимірну варіаційну систему з врахуванням структурних функцій і просіювання;
- ініціалізацію моделі на основі нелінійних нормальних мод ініціалізації;
- власне прогностичну модель;
- заключну обробку результатів моделювання з виконанням наступних операцій: конвертацію результатів розрахунків з форматів моделі (LFA та LFI) в GRIB формат; повний пост-процесінг розрахунків (розрахунки прогностичних атмосферних величин, які не використовуються в ході модельних розрахунків); діагностичні розрахунки на горизонтальних областях;
- щогодинну верифікацію модельних розрахунків.

Крім того, результати прогностичних розрахунків, отримані за допомогою моделі Harmonie, порівнювались з розрахунками за допомогою глобальної моделі GFS за той самий період і зі спостереженнями, які отримані на станціях Одеса-порт, Чорноморськ і порт Південний.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рисунках 2, 3 представлені розраховані циркуляційні форми атмосфери на стандартній висоті 10 м над Чорним морем в період з 9 по 13 жовтня 2016 р. Розрахунки проводилися з інтервалом 6 годин, але на рисунках показані лише з інтервалом 24 години. На картах рис. 2 показані потоки повітря над північно-західною частиною Чорного моря, а на рис.3 – їх детальна структура над Одеською затокою. Для порівняння, на цих картах також наведені прогностичні значення моделі GFS з розділенням 25 км та спостережені значення на станціях Одеса-порт, Чорноморськ і порт Південний. Карти на рис.3 чітко показують суттєву неоднорідність поля вітру над регіоном. Зокрема, над відкритою морською поверхнею швидкість вітру на 5-7 м/с вища, ніж над поверхнею суші; на початку розрахункового періоду 9 жовтня 2016 р. при західних вітрах над західним підвітряним узбережжям спостерігається послаблення вітру до 2-3 м/с і посилення вітру до 10-12 м/с – над східною частиною регіону. При зміні циркуляції 10 жовтня 2016 р. відмічається послаблення вітру до 2-3 м/с над північною та центральною частиною регіону, при збереженні сильних вітрів до 10-12 м/с над південною межею північно-західної частини регіону, яка приймає до глибоководної частини моря.



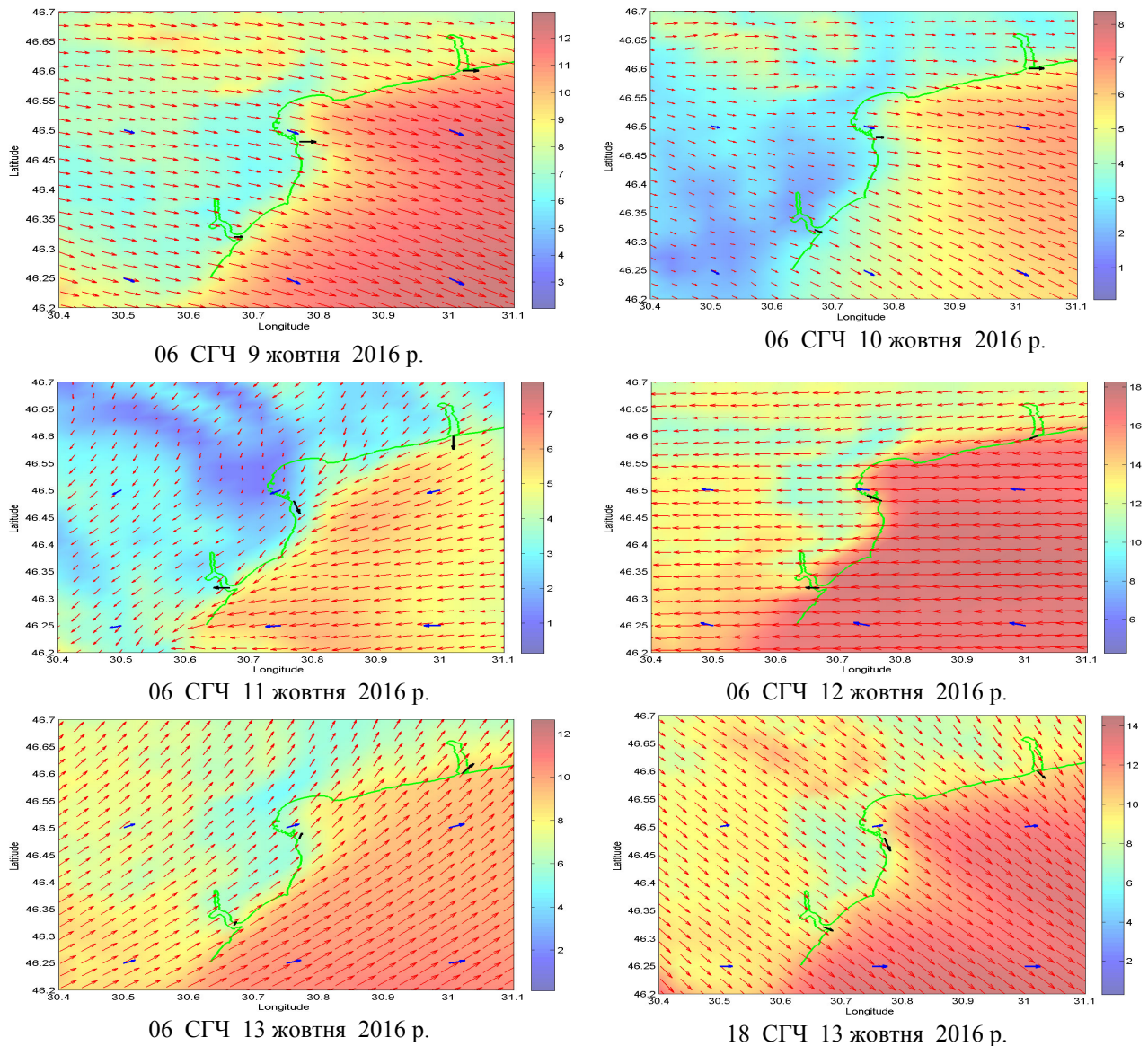
**Рис. 2** – Поле вітру над північно-західною частиною Чорного моря 9-13 жовтня 2016 р. Колірна шкала відповідає модулю швидкості вітру (м/с)

В кінці періоду 11-13 жовтня 2016 р. над всією північно-західною частиною панує сильний східний нагінний вітер зі швидкістю вище 15 м/с.

Карти з рис.3 дають можливість деталізувати поля вітру в прибережній зоні. З 9 до опівдні 10 жовтня 2016 р., при загальному західно-північно-західному напрямку, швидкість вітру над сушею складає 5-7 м/с з нічним послабленням до 2-3 м/с, тоді як над морською поверхнею вона досягає 8-12 м/с. При цьому виділяються дві особливості, які враховують місцеву циркуляцію, пов'язані з орографією і урбанізацією. Перша формує 3-5 км смугу послаблення вітру приблизно на 2 м/с з підвітряної сторони берегу. Міська забудова знижує швидкість вітру силь-

ніше – приблизно на 2-4 м/с. В ніч з 10 на 11 жовтня відбувалася зміна атмосферної циркуляції. В цей період швидкості вітру над Одеською затокою та прилеглими областями суші були мінімальними. Зміна циркуляції призвела до появи сильного нагінного східного вітру з максимальними значеннями вище 20 м/с, які спостерігалися 12 жовтня 2016 р. о 18 годині.

Порівняння прогностичних значень швидкості вітру за двома моделями – GFS і Harmonie, та зі спостереженнями на трьох станціях – Одеса-порт, Чорноморськ і порт Південний, демонструє такі загальні особливості. При слабких вітрах розрахункові значення за двома моделями



**Рис. 3** – Поля вітру над прибережним районом північно-західної частини Чорного моря 9-13 жовтня 2016 р. Колірна шкала відповідає модулю швидкості вітру (м/с). Червоні стрілки – модель Harmonie. Сині стрілки – модель GFS. Чорні стрілки – спостереження на станціях Чорноморськ, Одеса, Південний

та спостереженнями на станції Одеса-порт узгоджуються досить добре. В той же час, спостереження на станції Чорноморськ і, особливо, на станції порт Південний часто мають суттєві відмінності з модельними результатами стосовно напрямку вітру. Цей факт може вказувати на нерепрезентативність спостережень на цих станціях, обумовлених географічним розташуванням пунктів спостережень або появою нових забудов. Інша особливість порівняльних характеристик пов'язана з розбіжностями між модельними розрахунками, які значно зростають при зміні атмосферної циркуляції. На картах чітко видно, що модель GFS, з грубим просторовим розділенням сітки, не в змозі відтворити мезомасштабні

деталі атмосферної циркуляції в областях конвергенції потоків і взаємодії їх з особливостями підстильної поверхні, а також при різкій зміні атмосферної циркуляції.

Порівняльний аналіз характеристик вітру, вимірюваних в пунктах спостережень Одеса-порт, Чорноморськ та порт Південний, і розрахованих за обома моделями у вузлах сіток, найближчих до точок вимірювань, показав наступне (рис.4а-в). Насамперед необхідно відмітити, що в моделі GFS результати розрахунків відбиралися тільки за одним вузлом сітки, який відповідає кожному пункту спостережень, і ці вузли були розташовані в морі, в межах 10-15 км від берегу. Тоді як високе просторове розділення

моделі Harmonie дозволяло прийняти до розгляду декілька вузлів сітки в межах квадрату площею 2.5 x 2.5 км з центром в пункті спостережень. Це дало можливість приймати для розгляду по шість вузлів сітки Harmonie окіл станцій спостережень Одеса-порт та Чорноморськ, і два вузла сітки окіл станції порт Південний.

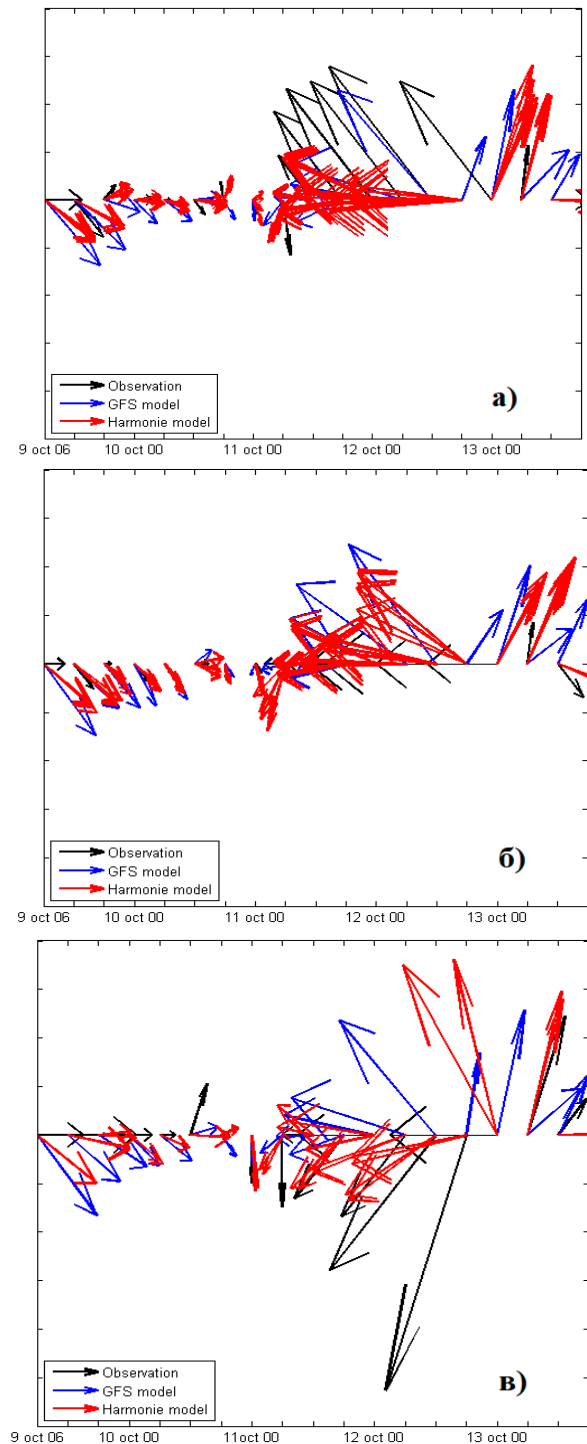
Епюри векторів швидкості вітру всіх трьох джерел інформації мають різний ступінь розбіжностей як на протязі розглянутого періоду, так і в залежності від точки спостереження. На станції порт Південний на всьому часовому відрізку спостерігається значна, а в другій половині інтервалу, після зміни циркуляції та посилення вітру, критична розбіжність у швидкості вітру, і особливо за напрямком вітру (від 45° та 90° до 180°), між спостереженнями, з одного боку, та модельними розрахунками за обома моделями, з іншого боку. Така ситуація може свідчити тільки про нерепрезентативність розташування пунктів вимірювань вітру через наявність локальних природних орографічних чи конструктивних перешкод, які критичним чином змінюють швидкість та напрямок потоку певних румбів.

У даному випадку, цілком нерепрезентативними для морської частини слід вважати спостереження на станції порт Південний. На початку розглянутого періоду, 9 та 10 жовтня 2016 р., при слабких і помірних північно-західних вітрах над районом, спостереження занижують швидкість вітру та показують помилку за напрямком на 45° і більше (рис.3). В період максимальних вітрів східних румбів зі швидкостями вище 20 м/с розбіжності між виміряним напрямком вітру і розрахованим за моделлю Harmonie складають близько 90°, а за моделлю GFS – майже 180°.

Проте, необхідно відмітити, що модель GFS неадекватно та із запізненням відтворює різку зміну циркуляції та мезомасштабні особливості динамічної структури атмосфери над морською поверхнею в області взаємодії двох синоптичних утворень (рис. 3, 12.10.2016.18:00).

На двох інших станціях спостережень, Одеса-порт і Чорноморськ, розбіжності між модельними та фактичними значеннями швидкості вітру повторюють загальну картину, хоча і в меншій мірі. На станції Чорноморськ загальна закономірність відмінностей проявляється у розбіжностях за напрямком вітру на 45° та заниженні швидкості вітру протягом всього розглянутого періоду, як при слабких, так і при екстремальних вітрах. Із вищевикладеного можна зробити ви-

сновок, що спостереження на цій станції не можуть розглядатися як репрезентативні для прилеглої морської частини, де над відкритою морською поверхнею вітер суттєво сильніший при будь-якому типі циркуляції.



**Рис.4** – Епюри швидкості вітру на станціях Одеса-порт (а), Чорноморськ (б), порт Південний (в) та в найближчих вузлах сіток моделей GFS та Harmonie

На станції Одеса-порт, на відміну від станції Чорноморськ, при слабких і помірних вітрах західних румбів на початку розглянутого періоду спостереження дають меншу швидкість у порівнянні з модельними розрахунками, тоді як при екстремальних вітрах східних румбів спостережені значення вищі за отримані при моделюванні. При цьому, зберігається розбіжність за напрямком вітру до  $45^\circ$ . Порівняння результатів отриманих за двома моделями для цього регіону показує такі відмінності: модель GFS завищує швидкості при слабких і помірних вітрах західних румбів на початку розглянутого періоду (9 та 10 жовтня 2016 р.); не встигає перелаштуватися та неадекватно описує поле вітру при різкій зміні синоптичних утворень в період з 10 жовтня 18:00 до 11 жовтня 6:00 2016 р., занижує швидкість вітру при екстремальних значеннях.

У силу вищезазначеного, проблематично розраховувати кількісні оцінки відмінностей значень швидкості вітру, отриманих при вимірюванні та розрахунку в моделях. Насамперед, це пов'язано з неоднорідністю початкових рядів спостережень та модельних розрахунків. Зокрема, ряди спостережень на прибережних станціях не можуть вважатися репрезентативними внаслідок наявності природних і штучних об'єктів навколо них, які породжують неоднорідні зміни у вимірюваннях при різних напрямках атмосферного потоку. Крім того, як показали розрахунки із використанням моделі високого розділення, вздовж берегової лінії прослідковується смуга перехідних значень швидкості вітру між тими значеннями, які спостерігаються над поверхнею суші та над морською поверхнею. Ширина цієї смуги змінюється в широких межах від 2-3 км до 10-12 км, в залежності від напрямку та швидкості вітру, або може бути відсутня зовсім. Так як берегові станції спостережень розташовані в цій смузі, то некоректно порівнювати спостереження на цих станціях з розрахунковими значеннями у вузлах модельних сіток, які знаходяться над відкритою морською частиною.

Кількісні порівняльні оцінки розрахункових значень вітру отриманих за допомогою двох моделей є певною мірою необ'єктивними в силу істотних (на два порядки) відмінностей їх просторового розділення. Як показано на картах (рис. 2,3), модель GFS не здатна відтворювати мезомасштабні особливості динамічної мінливості атмосфери навіть над однорідною морською поверхнею. Тоді як за допомогою поля вітру, отриманого із використанням моделі Harmonie, можливо виділити навіть межу міської забудови

м.Одеси, яка виділяється як острів ослаблених швидкостей. По суті, у разі порівняння результатів розрахунків за обома моделями, порівнюються атмосферні процеси різних масштабів, яким притаманні різні енергетичні кінематичні характеристики.

Проте, була зроблена спроба отримати деякі кількісні оцінки відмінностей у розрахунках швидкості вітру за двома моделями і, кожної з них, зі спостереженнями. На відміну від скалярних величин, аналіз різниць векторних величин пов'язаний з певними труднощами і ускладнює аналіз результатів. Зокрема, виникає проблема: як інтерпретувати різницю двох векторів, якщо вони рівні за модулем, але мають різні напрямки. Тому розглядалося тільки абсолютне значення різниці двох векторів, яке визначалося за формулою аналітичної геометрії

$$|a-b| = \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2},$$

де  $a$  і  $b$  – швидкість вітру з двох інформаційних джерел;  $a_x$ ,  $b_x$  – зональні компоненти швидкості вітру з двох інформаційних джерел;  $a_y$ ,  $b_y$  – меридіональні компоненти швидкості вітру з двох інформаційних джерел.

Еволюція у часі відмінностей між відповідними джерелами інформації показана на рис. 5, а отримані інтегральні оцінки представлені в таблиці 1.

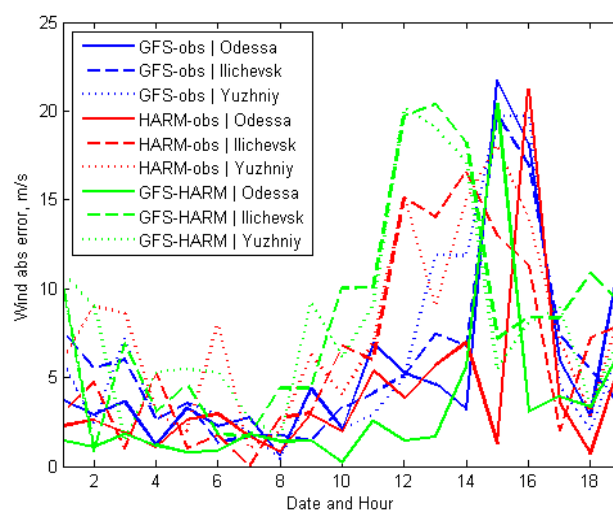


Рис. 5 – Еволюція у часі розбіжностей між спостереженнями та модельними розрахунками

В першу чергу слід відзначити значну мінливість відмінностей протягом аналізованого періоду, яка критичним чином залежить від атмосферної циркуляції. При слабких вітрах

**Таблиця 1.** – Інтегральна за часом за період експерименту оцінка розбіжностей розрахункових значень швидкості вітру (м/с) для трьох пунктів спостережень

|                        | Одеса | Чорноморськ | Південний |
|------------------------|-------|-------------|-----------|
| GFS - спостереження    | 5.66  | 5.85        | 6.21      |
| Harmonie-спостереження | 3.95  | 6.43        | 7.74      |
| GFS - Harmonie         | 3.18  | 8.42        | 8.21      |

західних румбів з боку берегу, в період з 10 жовтня 00:00 до 11 жовтня 12:00, узгодженість всіх розрахункових і спостережених значень швидкості вітру знаходиться в межах допустимої помилки прогнозу 5 м/с. При помірних вітрах тих же румбів 9 жовтня відмічаються істотні відмінності між модельними розрахунками і вимірюваннями швидкості вітру як за напрямком, так і за абсолютним значенням швидкості. При цьому слід зазначити, що розрахункові значення за обома моделями для цього періоду дають аналогічні результати, особливо для станції Одеса-порт. При посиленні вітру і зміні його напрямку на – з боку моря, починаючи з другої половини 11 жовтня і до кінця розрахункового періоду 13 жовтня, розбіжність між модельними результатами і спостереженнями досягає катастрофічних значень в 20-25 м/с. Такі значення обумовлені, зокрема, розбіжностями у визначенні напрямку вітру, які в більшості випадків перевищують  $90^\circ$ , а в окремих випадках на станції порт Південний досягають  $180^\circ$ .

Однак, необхідно відзначити, що саме при сильних вітрах східних румбів розрахунки за обома моделями узгоджуються дуже добре ( $\sim 3$  м/с), особливо в районі станції Одеса-порт. Такі результати порівняння однозначно вказують на нерепрезентативність спостережень вітру на станціях Чорноморськ і порт Південний.

#### 4. ВИСНОВКИ

Порівняльний аналіз результатів чисельного моделювання полів вітру із застосуванням Європейської моделі високого розділення Harmonie, прогностичних полів за моделлю GFS сайту американського центру прогнозів навколишнього середовища і спостережень на станціях північно-західного узбережжя Чорного моря для періоду зі складними погодними умовами і штормовими вітрами показав таке:

1. Модель GFS має просторову роздільну здатність 25 км і в стані адекватно відтворювати

великомасштабні атмосферні процеси над регіоном. Однак, при різкій зміні циркуляції, що супроводжується зміною напрямку вітру на протилежний і посиленням вітру, зазначається запізненням опису еволюції полів вітру в моделі. Крім того, модель, в силу грубого просторового розрішення, не в змозі враховувати мезомасштабні особливості атмосферної циркуляції, обумовлені відмінностями в типах підстильної поверхні, орографією, термічними контрастами і т.п.

2. Конвективно-роздільна модель Harmonie з просторовим кроком 2.5 км і кроком за часом 60 сек дає можливість детально відтворювати всю просторову мінливість до зазначеного масштабу та її еволюцію. Зокрема:

- виділяти окремі мезомасштабні, порядку десятків км, циркуляційні структури над однорідною морською поверхнею і відстежувати їх еволюцію і взаємодію;
- встановлювати положення смуг конвергенції в умовах збіжності потоків;
- визначати просторові характеристики вздовж берегу, підвітряні смуги послаблення вітру за умов, якщо вітер дме від берегу;
- деталізувати опис полів вітру в затоках і при складній конфігурації берегової смуги з урахуванням орографії;
- відтворювати послаблення вітру над областю міської забудови за рахунок збільшення шорсткості поверхні.

3. Порівняння результатів модельних розрахунків зі спостереженнями на станціях Одеса-порт, Чорноморськ і порт Південний у період складних погодних умов з 9 по 13 жовтня 2016 р. показало таке:

- осереднена за весь період розбіжність між модельними розрахунками і спостереженнями входить в допустимий інтервал помилки прогнозу (5 м/с) тільки для станції Одеса-порт за моделлю Harmonie;
- узгодженість модельних розрахунків за обома моделями зі спостереженнями знаходиться в межах допустимого інтервалу помилки прогнозу при слабких західних вітрах (з боку берегу);
- при помірних вітрах з боку берегу розбіжність між модельними результатами і спостереженнями незначно (до 5-7 м/с) перевищує допустимий інтервал помилки прогнозу;
- при сильних вітрах східних румбів з боку моря розбіжність між модельними результатами і спостереженнями досягає катастрофічних значень в 20-25 м/с. Такі значення обумовлені, головним чином, розбіжностями у визначенні напрямку (до  $180^\circ$ ) вектору швидкості вітру. Од-

нак, необхідно відзначити, що саме при сильних вітрах східних румбів розрахунки за обома моделями узгоджуються дуже добре ( $\approx 3$  м/с), особливо в районі станції Одеса-порт;

- такі результати порівняння однозначно вказують на сумнівну репрезентативність спостережень вітру на станціях Чорноморськ та порт Південний.

Результати наведені в роботі свідчать, що застосування атмосферної мезомасштабної моделі високої роздільної здатності для прогнозування вітрових умов в північно-західній частині Чорного моря дозволить значно підвищити якість оперативних прогнозів мінливості океанографічних характеристик в прибережних зонах моря.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Spatial and temporal characteristics of summer precipitation over central Europe in a suite of high-resolution climate models / Lind P., Lindstedt D., Kjellström E. *J. Climate*. 2016. №29. С. 3501–3518. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0463.1>.
2. Malardel S., Ricard D. An alternative cell-averaged departure point reconstruction for pointwise semi-Lagrangian transport schemes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2015. № 141. С. 2114–2126. <https://doi.org/10.1002/qj.2509>.
3. Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. / Baldauf M., Seifert A., Furstner J. *Monthly Weather Review*. 2011. № 139(12). С.3887-3905.
4. Вильфанд Р. Б., Ривин Г. С., Розинкина И. А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU. *Метеорология и гидрология*. 2010. № 1. С. 5–17.
5. Rontu L., Wastl C., Niemelä S. Influence of the details of topography on weather forecast-Evaluation of HARMONIE experiments in the Sochi Olympics domain over the Caucasian Mountains. *Front. Earth Sci.* 2016. № 4. С. 13. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00013>.
6. Baklanov A., Tijm S., Rontu L. HIRLAM/HARMONIE-Atmospheric Chemical Transport Models. *Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models* / Edited by Baklanov A., Mahura A., Sokhi R. Springer, 2011. С. 215-228.
7. Unified modelling and prediction of weather and climate: A 25 year Journey / Braun A., Milton S., Cullen M. et al. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012. № 93(12). С. 1865-1877.
8. A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere / Davies T., Cullen M.J.P., Malcolm A.J. et al. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2005. № 131. С. 1759-1768.
9. The Canadian Meteorological Center Data Assimilation and Forecasting System. *Weather and Forecasting*. / Fillion L., Tanguay M., Lapalme E. et al. 2010. № 25(6). С. 1645–1669.
10. High-Resolution GEM-LAM Application in Marine Fog Prediction: Evaluation and Diagnosis / Yang D., Ritchie H., Desjardins S. et al. *Weather and Forecasting*. 2010. № 25(2). С. 727-748.
11. Ефимов В. В., Барабанов В. С., Крупин А. В. Моделирование мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в Крымском регионе Черного моря. *Мор. гидрофиз. журнал*. 2012. № 1. С. 64-74.
12. The HARMONIE-AROME Model Configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP System / Bengtsson, L. et al. *Mon. Wea. Rev.* 2017. № 145. С. 1919-1935.
13. Иванов С. В., Рубан И. Г., Тучковенко Ю. С. Преимущества использования атмосферной мезомасштабной модели Harmonie для воспроизведения динамики вод в прибрежных районах моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 107-114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.10>
14. ECMWF, Operational implementation 12 May 2015. Part III: Dynamics and numerical procedures. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts IFS Doc. Cy41r1, 2015a, 29 с. URL: <http://www.ecmwf.int/en/elibrary/9210-part-iii-dynamics-and-numerical-procedures> (Accessed 20.05.2019)
15. ECMWF, Operational implementation 12 May 2015. Part IV: Physical processes. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts IFS Doc. Cy41r1, 2015b, 213 с. URL: <http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2016/16648-part-iv-physical-processes.pdf> (Accessed 18.03.2019)
16. Single interval shortwave radiation scheme with parameterized optical saturation and spectral overlaps / Mašek J., Geleyn J.-F., Brožková R. et al. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2016. №142. С. 304–326. <https://doi.org/10.1002/qj.2653>.
17. AROME-MetCoOp: A Nordic convective-scale operational weather prediction model / Müller M. et al. *Wea. Forecasting*. 2017. №32. С. 609–627. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0099.1>
18. Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system / Brousseau P., Seity Y., Ricard D. et al. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2016. № 142. С. 2231–2243. <https://doi.org/10.1002/qj.2822>.

## REFERENCES

1. Lind, P., Lindstedt, D., Kjellström, E. et al. (2016). Spatial and temporal characteristics of summer precipitation over central Europe in a suite of high-resolution climate models. *J. Climate*, 29, pp. 3501–3518. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0463.1>.
2. Malardel S. & Ricard, D. (2015). An alternative cell-averaged departure point reconstruction for pointwise semi-Lagrangian transport schemes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141, pp.2114–2126. <https://doi.org/10.1002/qj.2509>.
3. Baldauf, M., Seifert, A., Furstner, J. et al. (2011). Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. *Monthly Weather Review*, 139(12), pp. 3887-3905.
4. Vil'fand, R.M., Rivin, G.S., Rozinkina, I.A. (2010). Mesoscale weather short-range forecasting at the Hydrometcenter of Russia, on the example of COSMO-RU. *Russian Meteorology and Hydrology*, 35, pp. 1-9.
5. Rontu, L., Wastl C. & Niemelä, S. (2016). Influence of the details of topography on weather forecast-Evaluation of HARMONIE experiments in the Sochi Olympics domain over the Caucasian Mountains. *Front. Earth Sci.*, 4, p.13, <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00013>.
6. Baklanov, A., Tijm, S., Rontu, L. (2011). HIRLAM/HARMONIE-Atmospheric Chemical Transport Models. In: Baklanov, A., Mahura, A., Sokhi, R. (eds). *Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models*. Springer, pp. 215-228.

7. Braun, A., Milton, S., Cullen, M. et al. Unified modelling and prediction of weather and climate: A 25 year Journey. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2012, № 93(12), pp. 1865-1877.
8. Davies, T., Cullen, M.J.P., Malcolm, A.J. et al. (2005). A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 131, pp. 1759-1768.
9. Fillion, L., Tanguay, M., Lapalme, E. et al. (2010). The Canadian Meteorological Center Data Assimilation and Forecasting System. *Weather and Forecasting*, 25(6), pp. 1645-1669.
10. Yang, D., Ritchie, H., Desjardins, S. et al. (2010). High-Resolution GEM-LAM Application in Marine Fog Prediction: Evaluation and Diagnosis. *Weather and Forecasting*, 25(2), pp. 727-748.
11. Efimov, V.V., Barabanov, V.S., Krupin, A.V. (2012). Modelirovanie mezomasshtabnykh osobennostey atmosfery cirkulyatsii v Krymskom regione Chernogo morya [Modeling of mesoscale features of the atmospheric circulation in the Crimean Black Sea region]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal [Physical Oceanography J.]*, 1, pp. 64-74. (In Russ.).
12. Bengtsson, L. et al. (2017). The HARMONIE-AROME Model Configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP System. *Mon. Wea. Rev.*, 145, pp. 1919-1935.
13. Ivanov, S.V., Ruban, I.G., Tuchkovenko, Y.S. (2018). Advantages of using the Harmonie atmospheric mesoscale model for simulating water dynamics in offshore area. *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 1, 22, pp. 107-114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.10>
14. ECMWF, Operational implementation 12 May 2015. Part III: Dynamics and numerical procedures. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts IFS Doc. Cy41r1, 2015a.* Available at: <http://www.ecmwf.int/en/elibrary/9210-part-iii-dynamics-and-numerical-procedures> (Accessed 20.05.2019)
15. ECMWF, Operational implementation 12 May 2015. Part IV: Physical processes. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts IFS Doc. Cy41r1, 2015b.* Available at: <http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2016/16648-part-iv-physical-processes.pdf> (Accessed 18.03.2019)
16. Mašek, J., Geleyn, J.-F., Brožková, R., et al. (2016). Single interval shortwave radiation scheme with parameterized optical saturation and spectral overlaps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142, pp. 304-326. <https://doi.org/10.1002/qj.2653>.
17. Müller, M. et al. (2017). AROME-MetCoOp: A Nordic convective-scale operational weather prediction model. *Wea. Forecasting*, 32, pp. 609-627. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0099.1>
18. Brousseau, P., Seity, Y., Ricard D. et al. (2016). Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142, pp. 2231-2243. <https://doi.org/10.1002/qj.2822>.

## HIGH RESOLUTION MODELLING OF SEVERE WIND PATTERNS OVER THE NORTH-WEST BLACK SEA REGION

**R. V. Zazimko, S. E. Romanenko,  
I. G. Ruban, S. V. Ivanov,  
Yu. S. Tuchkovenko, O. V. Derik**

*Odessa State Environmental University,  
15 Lvivska Str., Odessa, 65016, Ukraine,*

[science@odeku.edu.ua](mailto:science@odeku.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

The research studies the performance of the convective-permitting Harmonie model in reproducing mesoscale features of the wind regime over the north-western part of the Black Sea. It allowed establishing the optimum configuration, projection and geometry of the model's high spatial resolution area over Ukrainian part of the Black Sea, preparing a digital format for a coastline based on the resolution and conducting numerical experiments to verify informativeness and stability of computations. It also presents a detailed description of the forecasting procedure which includes a data flow from the Meteorological Archiving and Retrieving System (MARS) of the European Center, creating boundary conditions, forecast computations and a model output composition for the particular region and domain resolution.

The results have shown that the Harmonie model with the 2.5 km spatial resolution and the 60 second time step is able to reproduce detailed spatial variability of a near-surface wind field and its evolution to the corresponding scales. In particular, the model is able to simulate mesoscale circulation features of approximately ten km over a homogeneous sea surface and to track their evolution; to monitor the position of convergence zones; to highlight the spatial characteristics of a lee-side wind attenuation band along the coast line when wind blows from the shore; to specify mesoscale wind patterns in bays and along the coastline with complex orogra-

phy; to reproduce the weakening of a wind velocity over an urban area due to increased surface roughness.

Two operational forecasting systems, GFS-WRF and ARPEGE/IFS-Harmonie are compared by the following components: numerical solvers, sub-grid parameterizations, efficiency of computer resources and intellectual potential. The GFS model output with the 25 km spatial resolution is able to correctly reproduce over the region only large-scale atmospheric patterns. However, for rapid changes in the atmospheric circulation accompanied by changes in the wind direction to the opposite and wind increase, the model simulations are delayed in terms of wind field evolution. Additionally, because of crude spatial resolution, the GFS model is unable to describe mesoscale atmospheric features due to differences in surface types, orography, thermal contrasts, etc. Comparison of the both model outputs versus observations from Odesa, Chornomorsk and Yuzhnyi port during severe wind conditions has shown that the discrepancy between the models and observations within the allowable error value (5 m/s) occurred only for Odesa port with regard to the Harmonie model for weak wind velocity. The difference partially increases for moderate wind from the shore, while for strong wind from east and south directions indicates disagreement between the model results and observations and achieves critical values of 20-25 m/s. Such values are mainly determined by the discrepancy in wind direction (up to 180°). The comparison results clearly indicate the doubtful representativeness of wind observations at Chornomorsk and Yuzhnyi stations in general, and at Odesa station in particular.

**Keywords:** convective-permitting Harmonie model, north-western part of the Black Sea region, wind field

## МОДЕЛИРОВАНИЕ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ СЛОЖНЫХ ВЕТРОВЫХ УСЛОВИЙ НАД СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТЬЮ ЧЕРНОГО МОРЯ

**Р. В. Зазимко, С. Е. Романенко,  
И. Г. Рубан, С. В. Иванов,  
Ю. С. Тучковенко, О. В. Дерик**

*Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина,  
[science@odeku.edu.ua](mailto:science@odeku.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

Исследованы возможности конвективно-разрешающей модели Harmonie при воспроизведении мезомасштабных особенностей ветрового режима над северо-западной частью Черного моря. Установлены оптимальные размеры, проекция и геометрия области высокого пространственного разрешения модели над украинской частью акватории Черного моря, подготовлен цифровой формат береговой линии соответствующего разрешения, и проведены эксперименты на информативность и устойчивость расчетов.

Результаты модельных расчетов показали, что модель с пространственным шагом 2.5 км и шагом по времени 60 сек дает возможность детально воспроизводить всю пространственную изменчивость ветровых условий указанного масштаба и ее эволюцию. В частности, выделять отдельные мезомасштабные, порядка десяти км, циркуляционные структуры над однородной морской поверхностью и отслеживать их эволюцию; устанавливать положения полос конвергенции в условиях сходимости потоков; отмечать пространственные характеристики вдольбереговых подветренных полос ослабления циркуляции при условии ветра дующего от берега; детализировать описание полей ветра в заливах и при сложной конфигурации береговой черты с учетом орографии; воспроизводить ослабление ветра над областью городской застройки за счет увеличения шероховатости поверхности.

Сравнительный анализ расчетных полей ветра по моделям Harmonie и GFS (Global Forecast System) показал, что последняя модель, имея пространственное разрешение 25 км, в состоянии адекватно воспроизводить только крупномасштабные атмосферные процессы над регионом. Однако, при резком изменении циркуляции, сопровождающейся изменением направления ветра на противоположный и усилением ветра, отмечается запаздывание эволюции полей ветра. Кроме того, модель GFS, вследствие грубого пространственного разрешения, не в состоянии учитывать мезомасштабные особенности атмосферной циркуляции, обусловленные различиями в типах подстилающей поверхности, орографией, термическими контрастами и т.п. Сравнение модельных расчетов с наблюдениями на станциях Одесса-порт, Черноморск и порт Южный в период сложных погодных условий показало, что осредненное за весь период расхождение между модельными результатами и наблюдениями входит в допустимый интервал ошибки прогноза (5 м/с) только для станции Одесса с моделью Harmonie. При умеренных ветрах со стороны берега расхождение между модельными результатами и наблюдениями незначительно (до 5-7 м/с) превышает допустимый интервал ошибки прогноза, тогда как при сильных ветрах восточных румбов со стороны моря расхождение между модельными результатами и наблюдениями достигает катастрофических значений в 20-25 м/с. Такие значения обусловлены, главным образом, различиями в определении направления (до 180 °) и скорости ветра. Результаты сравнения однозначно указывают на сомнительную репрезентативность наблюдений ветра на станциях Черноморск и порт Южный, и частично на станции Одесса-порт.

Результаты, приведенные в работе, свидетельствуют о том, что применение атмосферной мезомасштабной модели высокого разрешения для прогнозирования ветровых условий в северо-западной части Черного моря позволит значительно повысить качество оперативных прогнозов изменчивости океанографических характеристик в прибрежных зонах моря.

**Ключевые слова:** конвективно-разрешающая модель Harmonie, северо-западная часть Черного моря, поле ветра.

*Подання до редакції: 02. 06. 2020  
Надходження остаточної версії: 20. 06. 2020  
Публікація статті: 03. 07. 2020*

УДК: 551.582.1

## РЕЖИМ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ ТА ОПАДІВ В УКРАЇНІ В 2021-2050 РОКАХ ЗА ДАНИМИ АНСАМБЛЮ МОДЕЛЕЙ CORDEX

М. С. Замфірова, В. М. Хохлов

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

Для періоду 2081–2100 років у порівнянні з 1986–2005 роками очікується підвищення глобальної температури на 0,3–4,8 °C. За результатами попередніх досліджень, у найближчому майбутньому середньорічна температура повітря в усіх регіонах України буде збільшуватися, а максимальне збільшення кількості опадів очікується переважно у західному та північному регіонах взимку та навесні, і зменшення – у центральному, східному та південному регіонах влітку та восени. Ця стаття має на меті виявлення особливостей змін температури повітря та опадів для різних регіонів України у 2021-2050 роках за результатами моделювання ансамблю моделей CORDEX за сценарієм RCP4.5. Для аналізу було відібрано 16 симуляцій за 7 регіональними кліматичними моделями і результати представлені для п'яти обласних центрів України – Києва, Львова, Кропивницького, Харкова та Одеси.

Показано, що майбутні місячні опади в усіх регіонах мають тенденцію до збільшення в середньому на 20–40 мм протягом осені, зими та весни, а влітку очікується їх зменшення. На півдні України за деякими моделями в липні та серпні опади будуть близькими до нуля, що є характерним для середземноморського клімату. У порівнянні з 1961–1990 роками, найменших змін зазнає середньомісячна температура повітря весною та восени (до 1 °C), тоді як збільшення температури влітку та взимку становитиме 2,5–3,5 °C. В Одесі, на відміну від сьогодення, очікується додатна середньомісячна температура повітря протягом всього року, і тільки 25% симуляцій показують від'ємні середньомісячні мінімальні температури. На півночі України зростання середньомісячної мінімальної та максимальної температури взимку становитиме 2,0–2,5 °C, а влітку істотно підвищуватиметься тільки максимальна температура повітря.

Таким чином, можна припустити зміну характеру вологозабезпеченості території України у найближчі тридцять років. Також можна передбачити велику ймовірність відсутності снігового покриву протягом усієї зими на півдні України внаслідок додатних температур.

**Ключові слова:** зміна клімату; температура повітря; опади; сезонний хід; CORDEX

### 1. ВСТУП

Останніми роками зміни клімату привернули велику увагу наукової спільноти внаслідок того, що їх вплив простежується по усій земній кулі. П'ятий звіт про оцінку Міжурядової групи експертів зі змін клімату [1] однозначно визначає потепління кліматичної системи, і, починаючи з 1950-х років, велика кількість спостережених змін була безпрецедентною на масштабі часу від декількох десятиліть до тисячоліть. У північній пікулі, тридцятирічний період 1983–2012 років був, ймовірно, найтеплішим за останні 1400 років, а швидкість збільшення середньої глобальної температури в період 1951–2012 років становила 0,12 °C на десятиліття. За даними зазначе-

ного звіту, головним чинником спостережуваного потепління з середини 20-го століття з великою ймовірністю є антропогенні викиди парникових газів.

Залежно від майбутніх сценаріїв викидів протягом 21-го століття очікується підвищення глобальної температури – у порівнянні з 1986–2005 роками воно становитиме 0,3–0,7 °C для періоду 2016–2035 років та 0,3–4,8 °C за період 2081–2100 років. Стосовно ж опадів, П'ятий звіт про оцінку повідомляє про неоднорідні зміни у майбутньому, причому в багатьох випадках вони порівняні з природною внутрішньою мінливістю клімату [1].

Враховуючи вище викладене, інтерес до стратегій пом'якшення та адаптації до зміни клімату

підвищується [2], і оскільки опади та температура є двома основними показниками стану кліматичної системи, їх дослідження є важливим. Як і тенденції змін метеорологічних величин у минулому, так і прогнози за кліматичними моделями можуть бути використані для виявлення та кількісної оцінки змін клімату. Особливо це стосується регіонального клімату, зокрема в Україні.

Просторово-часовий розподіл температури та опадів на території України в минулому та найближчому майбутньому досліджувався у багатьох наукових працях (див. [3–11]). Наприклад, було виявлено, що середньорічна температура повітря в усіх регіонах України збільшувалась і буде збільшуватися, причому в середньому зростання до середини поточного століття у порівнянні з кінцем минулого становитиме приблизно 1,2 °С. Якщо у майбутньому реалізується так званий помірний сценарій A1B – зміни в опадах будуть неістотними, а за несприятливого сценарію A2 в західних, центральних та північних областях України річна кількість опадів збільшиться приблизно на 10% [7]. Треба відзначити, що наведені відомості стосуються результатів тільки за однією моделлю і, відповідно, не можуть вважатися достатньо визначеними.

Краковська та ін. [8], використовуючи ансамбль з 10 моделей проекту ENSEMBLES, показали, що у порівнянні з періодом 1961–90 років приземна температура в Україні до середини 21-го століття по окремих місяцях та областях може збільшитися аж на 3,0 °С, а у середніх річних значеннях – від 1,6 до 2,1 °С. Причому найбільше таке зростання температури простежуватиметься на північному сході, сході та півдні України. В іншій роботі [9] тих же авторів, яка стосувалася опадів та в якій використовувався ансамбль з 4 моделей проекту ENSEMBLES, зазначається, що місячні суми опадів зміняться на середину століття на території України від –18 до +37 %. Причому максимальне збільшення очікується переважно у західному та північному регіонах взимку та навесні, а зменшення – у центральному, східному та південному регіонах влітку та восени.

Отже, головним висновком з попередніх досліджень є підвищення температури повітря в усій Україні в найближчому майбутньому, а кількість опадів буде змінюватись залежно від регіону. Проте, можна висловити й певні зауваження стосовно невизначеності результатів внаслідок використання ансамблю з невеликої кількості моделей, незважаючи, навіть, на те, що ці моделі були відповідним чином відібрані конкретно для території України [12].

Тільки в останні роки з'явилися результати моделювання за проектом CORDEX [13] за великою кількістю моделей та з невеликим кроком сітки в горизонтальній площині, що дозволяє визначити майбутні температури та опади з достатньою точністю і визначеністю. Вони вже широко використовуються для аналізу характеристик майбутнього клімату (див. [14]). Саме тому ця стаття має на меті виявлення особливостей змін температури повітря та опадів для різних регіонів України у найближче тридцятиліття за результатами моделювання ансамблю моделей CORDEX.

## 2. ДАНІ ПРОЕКТУ CORDEX

Як вже зазначалося вище, як вхідна інформація для розрахунків майбутньої температури повітря та опадів використовувались результати моделювання за проектом CORDEX. З чотирьох можливих сценаріїв у цій статті брався лише RCP4.5 [15], для якого у січні 2020 року кількість симуляцій в ансамблі, які надавали середньодобову приземну температуру повітря з роздільною здатністю ~12,5 км у горизонтальній площині для Європи, становила 22. Нагадаємо, що за сценарієм RCP4.5 передбачається збільшення радіаційного форсингу на 4,5 Вт/м<sup>2</sup> у порівнянні з передіндустріальною епохою і найбільших величин викиди парникових газів сягнуть у 2030–50 роки.

Для подальшого аналізу було відібрано 16 моделювань (симуляцій) за 7 регіональними кліматичними моделями (табл. 1). Для кожної симуляції дані про середньодобову, мінімальну та максимальну приземну температуру повітря використовувались для розрахунку середніх за тридцять років (період 2021–2050) місячних величин. Таким же чином для кожної симуляції розраховувались місячні суми опадів.

Графічно подати результати для усіх симуляцій одночасно зручно за допомогою так званої коробчастої діаграми або «ящиків з вусами». Верхня і нижня кришки «ящика» задають положення кватилей 25 % і 75 % та визначають область 50 % значень навколо центру розподілу для 16 симуляцій.

Положення медіани (лінія всередині «ящика») щодо кришок визначає асиметрію без урахування аномальних значень. Верхній і нижній «вуса» визначають максимальне та мінімальне значення відповідно серед симуляцій. Зазначимо також, що чим більше розмір ящика, тим більше є невизначеність майбутнього клімату.

**Таблиця 1** – Регіональні кліматичні моделі, результати яких використані у статті

| Індекс моделі | Інститут                                             | Регіональна модель             | Глобальна модель              |
|---------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| CLMcom1       | Climate Limited-area Modelling Community             | CLMcom-CCLM4-8-17 <sup>1</sup> | CNRM-CM5 <sup>8</sup>         |
| CLMcom2       |                                                      |                                | ICHEC-EC-EARTH <sup>9</sup>   |
| CLMcom3       |                                                      |                                | MOHC-HadGEM2-ES <sup>10</sup> |
| CLMcom4       |                                                      |                                | MPI-ESM-LR <sup>11</sup>      |
| DMI1          | Danish Meteorological Institute                      | DMI-HIRHAM5 <sup>2</sup>       | ICHEC-EC-EARTH <sup>9</sup>   |
| DMI2          |                                                      |                                | NCC-NorESM1-M <sup>12</sup>   |
| KNMI1         | Royal Netherlands Meteorological Institute           | KNMI-RACMO22E <sup>3</sup>     | ICHEC-EC-EARTH <sup>9</sup>   |
| KNMI2         |                                                      |                                | MOHC-HadGEM2-ES <sup>10</sup> |
| MPI           | Max Planck Institute for Meteorology                 | MPI-CSC-REMO2009 <sup>4</sup>  | MPI-ESM-LR <sup>11</sup>      |
| SMHI1         | Swedish Meteorological and Hydrological Institute    | SMHI-RCA4 <sup>5</sup>         | CNRM-CM5 <sup>8</sup>         |
| SMHI2         |                                                      |                                | ICHEC-EC-EARTH <sup>9</sup>   |
| SMHI3         |                                                      |                                | IPSL-CM5A-MR <sup>13</sup>    |
| SMHI4         |                                                      |                                | MOHC-HadGEM2-ES <sup>10</sup> |
| SMHI5         |                                                      |                                | MPI-ESM-LR <sup>11</sup>      |
| CNRM          | National Centre for Meteorological Research (France) | ALADIN63 <sup>6</sup>          | CNRM-CM5 <sup>8</sup>         |
| IPSL          | Institute Pierre-Simon Laplace                       | WRF381 <sup>7</sup>            | IPSL-CM5A-MR <sup>13</sup>    |

**Примітки:**

1. <https://wiki.coast.hzg.de/clmcom/clm-community-home-92864627.html>
2. <https://www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/TR/tr06-17.pdf>
3. <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubTR/TR302.pdf>
4. <https://www.remo-rcm.de/059966/index.php.en>
5. [https://www.smhi.se/polopoly\\_fs/1.90275!/Menu/general/extGroup/attachmentColHold/mainCol1/file/RMK\\_116.pdf](https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.90275!/Menu/general/extGroup/attachmentColHold/mainCol1/file/RMK_116.pdf)
6. <http://www.umr-cnrm.fr/aladin/>
7. <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
8. <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article126&lang=en>
9. <https://www.ichec.ie/partnerships/state-supported/ec-earth-climate-simulations-irelands-contributions-cmip6>
10. <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem2>
11. <https://mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/>
12. <https://folk.uib.no/ngfhd/EarthClim/index.htm>
13. <http://cmc.ipsl.fr/ipsl-climate-models/ipsl-cm5/>

Результати представлені для п'яти обласних центрів України – Києва, Львова, Кропивницького, Харкова та Одеси, які умовно можна вважати репрезентативними для відповідних регіонів України, хоча у подальшому потрібно зробити аналіз для усієї України. Зазначимо, що для метеорологічних станцій бралися дані з найближчого вузла розрахункової сітки регіональної кліматичної моделі, причому ці сітки можуть відрізнятися одна від іншої залежно від симуляції.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1–4 подані у вигляді коробчастих діаграм суми опадів, середні, максимальні та міні-

мальні температури повітря по місяцях року, осереднені за період 2021–2050 років для зазначених вище обласних центрів України. Пояснимо нанесене на цих рисунках на прикладі місячної суми опадів для Києва. Для січня 8 з 16 симуляцій (тобто 50 %) показують, що місячна сума опадів складатиме від приблизно 45 до 60 мм. Мінімальна кількість опадів з ансамблю симуляцій становитиме приблизно 38 мм, а максимальна – 62 мм. Медіана становитиме приблизно 52 мм. На цих рисунках наведені також середні значення за ансамблем симуляцій у вигляді чорних крапок (які, у більшості випадків, майже збігаються з медіанами) та середні значення метеорологічних величин, розраховані для періоду 1961–1990 років (суцільні лінії), кліматична норма у минулому, з якою зазвичай порівнюють

результати моделювання майбутнього клімату.

Отже, за кліматичними даними річний хід опадів в Україні має два добре виражених максимуми – влітку та взимку. Як правило літній максимум перевищує зимовий в півтора-два рази, за винятком Одеси, де вони майже однакові (див. рис. 1). У минулому літній максимум опадів спостерігався у липні і становив від 45 мм в Одесі до 100 мм у Львові.

Перше, на що можна звернути увагу на рис. 1, – для кожного регіону мінімальні значення з ансамблю 16 симуляцій набагато (в декілька разів) менші за кліматичні, а в Одесі одна з них показує майже цілковиту відсутність опадів у липні. Як виявилось, за двома симуляціями – CLMcom1 та CLMcom3 (див. табл. 1) – істотно занижуються опади в липні та серпні. Але, навіть якщо вилучити ці дві симуляції з ансамбля та побудувати коробчасту діаграму без них, як це зроблено на правій нижній панелі рис. 1, все одно велика кількість інших моделей показують істотне зменшення опадів в липні та серпні для Одеси. Тому було вирішено у подальшому аналізі використовувати результати ансамбля з усіх 16 симуляцій.

Отже, на рис. 1 можна побачити, що у найближчому майбутньому максимум теплого періоду спостерігатиметься у травні або червні і трошки зменшиться в усіх регіонах, за винятком Харкова. Також влітку реєструватиметься й найістотніше зменшення опадів в липні та серпні, причому в Києві, Кропивницькому та Одесі опади в липні зменшаться приблизно в 1,5 рази. Зимовий максимум, який зазвичай спостерігався у грудні, навпаки збільшиться або, принаймні, залишиться незмінним (Львів, Київ). Найбільше зростання опадів взимку спостерігатиметься у Харкові, в якому кількість опадів у грудні становитиме на 20 мм більше за кліматичну норму у минулому, і літній та зимовий максимуми опадів майже зрівняються за величиною. Найбільш невизначеними будуть місячні суми опадів влітку, особливо в Києві, де половина симуляцій показує величини, наприклад, в червні від 50 до 100 мм. Але, у цілому та в середньому по моделях рис. 1 свідчить про те, що опади в Україні збільшуватимуться для усього року за винятком літніх місяців. Особливо великим (іноді в півтора рази) це збільшення буде на сході України.

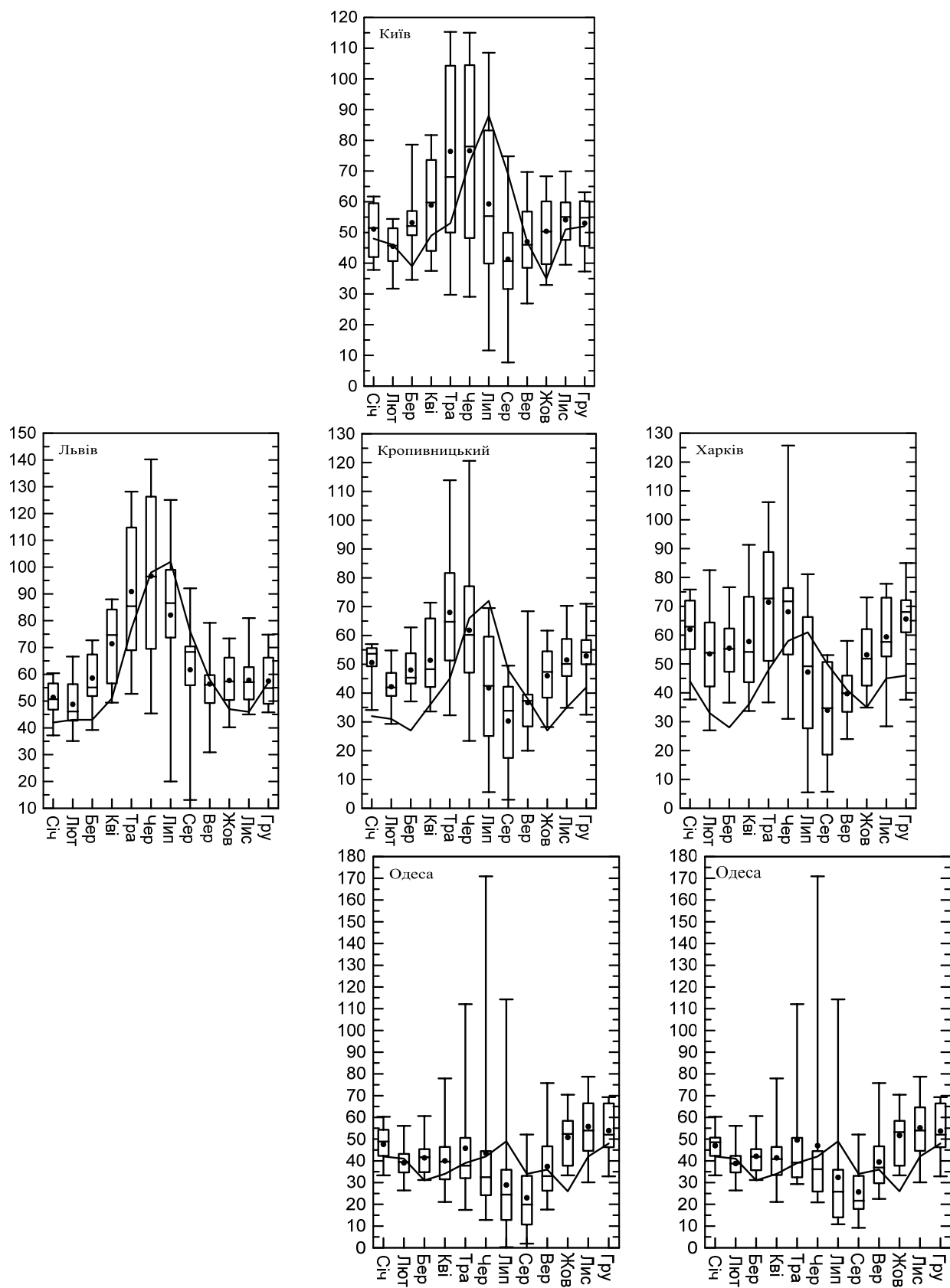
Середньомісячна температура повітря у найближчому майбутньому (рис. 2) буде збільшуватися за винятком квітня та травня, причому це буде характерним для усієї України. Найбільших змін зазнає середньомісячна температура взимку та влітку, а найменших весною та восени. Жодна

симуляція не показує майбутню температуру в січні та лютому нижчу за кліматичну норму у минулому, а середня по ансамблю перевищує цю норму у січні на 2,0–5,0 °С. Хоча, велике зростання січної температури в Одесі може бути, насправді, впливом більш теплої в зимовий період водної поверхні Чорного моря. Температура в липні збільшиться на 2,5–3,5 °С і найбільшою буде на півдні України, сягаючи середніх за ансамблем значень ~24 °С. Також можна відзначити, що літня температура буде більше невизначеною, ніж зимова. Цікавим є також й те, що середньомісячна температура травня для усієї України буде або дорівнювати, або нижча за кліматичну норму у минулому, що є винятком з переважного підвищення температури у майбутньому.

Річний хід максимальної та мінімальної температур повітря (рис. 3 і 4), тобто температур вдень і вночі, відповідно, в цілому повторюють хід середньої температури повітря, але й для них можна визначити певні відмінності від поточного клімату.

На заході, півдні та у центрі України щонайменше 75% симуляцій надає додатну денну температуру протягом усього року (рис. 3). Отже, існує велика ймовірність того, що у цих регіонах опади взимку хоч й формуватимуть сніговий покрив, але він буде нестійким через танення у денні години доби. Найбільше підвищення температури у найбільш холодному місяці року, січні, спостерігатиметься в Одесі і, взагалі, жодна з моделей не надає взимку середньої температури вдень нижче 4,0 °С. Влітку денна температура підвищиться в усіх регіонах приблизно на 2,5 °С, сягаючи на сході України максимуму приблизно 28 °С у липні. Також можна відзначити достатньо велику невизначеність результатів моделювання максимальної температури в літні місяці.

Нічна температура в середньому за ансамблем та по усій Україні зазнає найбільших змін взимку (рис. 4). Наприклад, для Одеси в січні мінімальна температура у середньому підвищиться майже на 5,0 °С. Більше того, тільки 25% симуляцій показує нічну температуру у січні меншу за 0 °С. Отже, на півдні України існує велика ймовірність того, що навіть ті опади, які випадатимуть у вигляді снігу вночі, не будуть накопичуватись у вигляді снігового покриву і відразу ж тануть. Також можна звернути увагу на те, що нічна температура в Києві у квітні, травні та червні буде нижча за кліматичну норму у минулому.



**Рис. 1** – Місячні суми опадів за період 2021-2050 рр. у Києві, Одесі, Кропивницькому, Львові та Харкові у вигляді «ящика з вусами» (дивись пояснення у тексті статті) за результатами ансамблю 16 моделей (14 моделей для Одеси у нижньому правому куті) проекту CORDEX (Вісь X – місяці року; вісь Y – кількість опадів, мм)

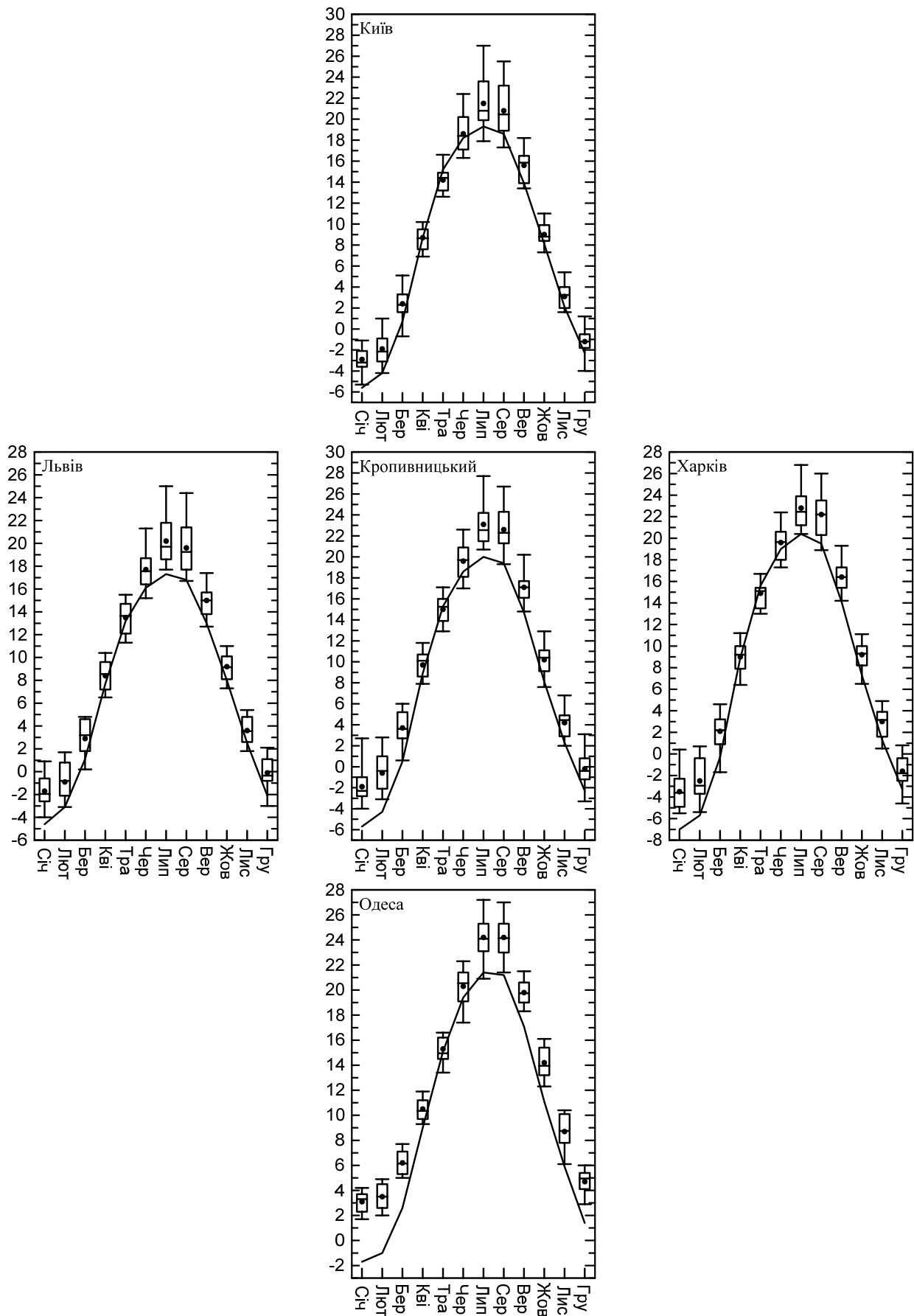


Рис. 2 – Так само, як на рис. 1, але для середньомісячних температур повітря

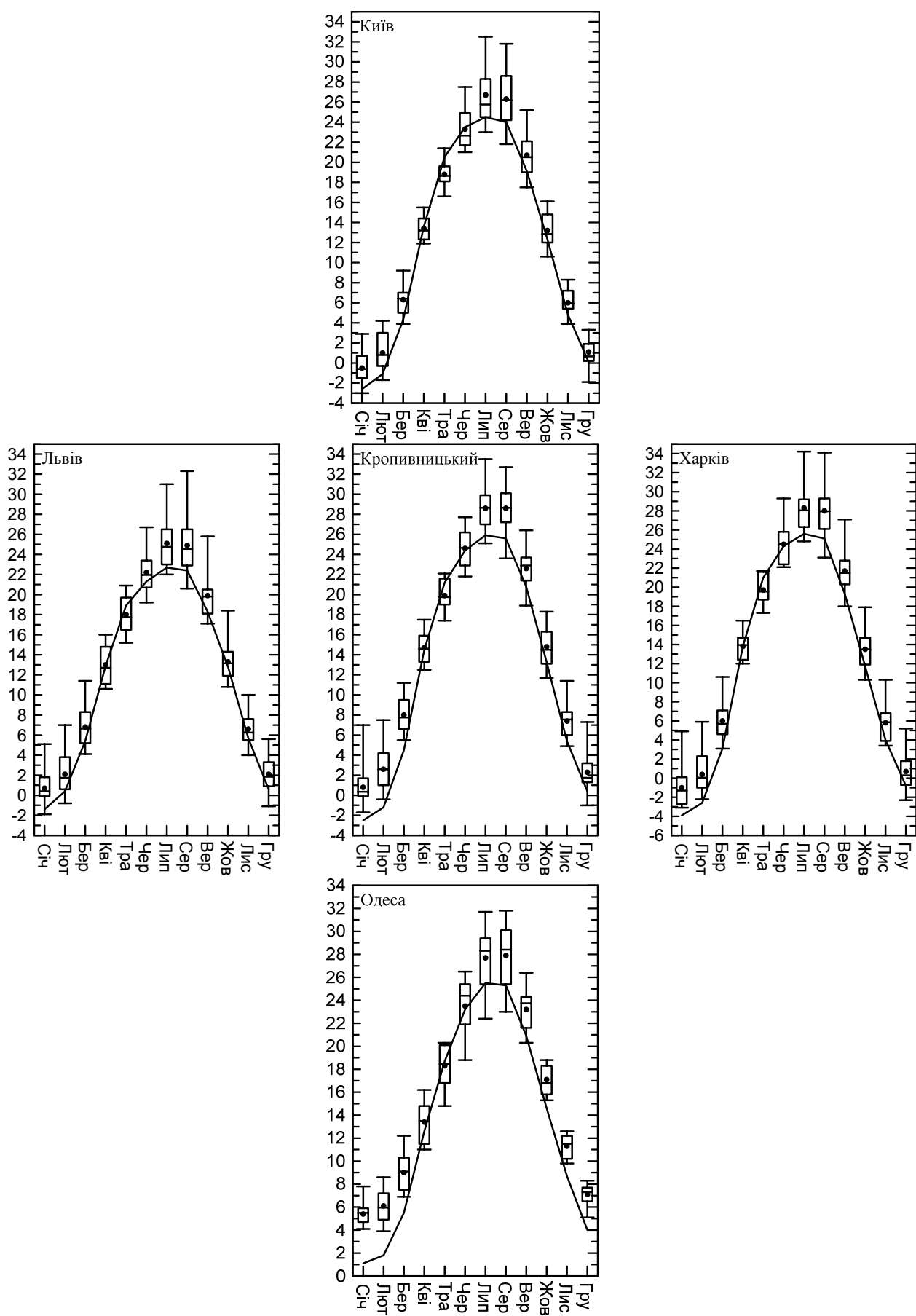


Рис. 3 – Так само, як на рис. 1, але для середньомісячних максимальних температур повітря

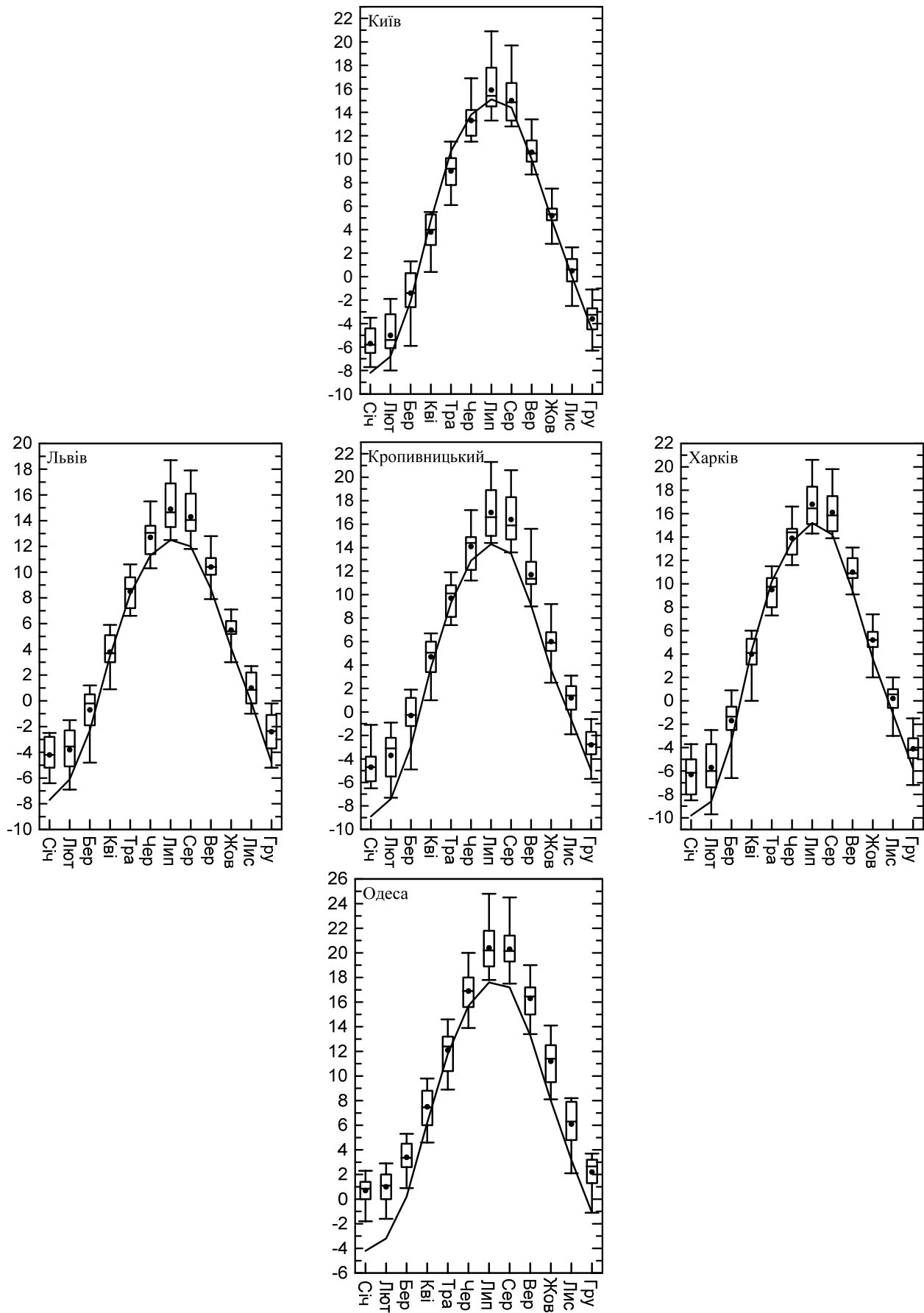


Рис. 4 – Так само, як на рис. 1, але для середньомісячних мінімальних температур повітря

Якщо порівнювати результати, наведені у цій статті, з отриманими раніше для ансамблю моделей проекту ENSEMBLES (див., напр., [8, 9]), можна відзначити їх відносно добру узгодженість між собою. Найбільші відмінності стосуються екстремальних значень, на кшталт, мінімальних опадів влітку або істотного підвищення температури взимку на півдні України.

#### 4. ВИСНОВКИ

Те, що клімат в Україні змінюється, доведено великою кількістю наукових робіт, тільки частина з яких цитувалась в цій статті. Результати здійсненого в цій статті дослідження також свідчать про те, що в найближчому майбутньому відбудуватиметься подальше збільшення температури повітря та відзначатимуться зміни в режимі опадів по усій Україні.

Хоча й потрібно мати на увазі велику невизначеність опадів у літні місяці, характерною рисою майбутнього клімату може бути зсув максимуму опадів влітку з липня на травень. Більше того, на півдні України кількість опадів влітку може істотно зменшитися. Враховуючи й збільшення температури повітря в цьому регіоні, можна припустити перехід до середземноморського клімату, який характеризується сухим та спекотним літом і вологою та теплою зимою. Також, на заході, півдні та у центрі України взимку температура вдень з великою ймовірністю не буде опускатися нижче нуля, що свідчить про відсутність снігового покриву у цих регіонах. На півдні України будуть спостерігатися додатні нічні температури взимку, що взагалі свідчить про невелику ймовірність опадів у вигляді снігу протягом холодного періоду року.

Результати, наведені в цій статті, були отримані за ансамблем моделей CORDEX, який є найсучаснішою симуляцією майбутнього клімату і має роздільну здатність ~12,5 км у горизонтальній площині, що дозволяє якнайкраще моделювати опади. Проте, використовувалися дані тільки для одного сценарію RCP4.5 та обмеженої кількості пунктів в Україні. Отже, надалі треба зробити подібний аналіз для сценаріїв RCP2.6 і RCP8.5 та усієї території України. Також, цікавим може виявитися аналіз впливу майбутніх змін циркуляції атмосфери на повторюваність екстремальних опадів, посух та хвиль тепла, як це зроблено, наприклад, в [16, 17].

#### 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. Pietrapertosa F. et al. Climate change adaptation policies and plans: A survey in 11 South East European countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2018. Vol. 81(2). Pp. 3041–3050. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.116>
3. Хохлов В. Н. Количественное описание изменений климата Европы во второй половине XX века. *Український гідрометеорологічний журнал.* 2007. № 2, С. 35–42.
4. Хохлов В. М., Латиш Л. Г., Цимбалюк К. С. Возможные зміни температурного режиму в Україні у 2011–2025 роках. *Вісник Одеського державного екологічного університету.* 2009. Вип. 8. С. 70–78.
5. 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.
6. 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.
7. 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>
8. Проекції приземної температури та відносної вологості повітря в областях України до середини ХХІ ст. за даними ансамблів регіональних кліматичних моделей / С. В. Краковська та ін. *Геоінформатика.* 2018. № 3(67). С. 62–77.
9. Зміни поля опадів в Україні у ХХІ ст. за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей / С. В. Краковська та ін. *Геоінформатика.* 2017. № 4(64). С. 62–74.
10. 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.
11. Проекції изменения климатических средних показателей экстремальности термического режима к середине ХХІ века в Украине / Балабух В. А. и др. *Природопользование.* 2018. № 1. С. 97–113.
12. Краковская С. В. Оптимальный ансамбль региональных климатических моделей для оценки изменений температурного режима в Украине. *Природопользование.* 2018. № 1. С. 114–126.
13. 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>
14. El Hadri Y. et al. Wind energy land distribution in Morocco in 2021–2050 according to RCM simulation of CORDEX-Africa project. *Arabian Journal of Geosciences.* 2019. Vol. 12(24). Article 753. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4950-7>
15. Moss R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature.* 2010. Vol. 463. Pp. 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
16. Loboda N. S. et al. Using non-decimated wavelet decomposition to analyse time variations of North Atlantic Oscillation, eddy kinetic energy, and Ukrainian precipitation. *Journal of Hydrology.* 2006. Vol. 322(1–4).

- Pp. 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.029>
17. Shevchenko O. et al. Long-term analysis of heat waves in Ukraine. *International Journal of Climatology*. 2014. Vol. 34(5), Pp. 1642-1650. <https://doi.org/10.1002/joc.3792>

## 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. 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>
3. Khokhlov, V.N. (2007). [Quantitative description of European climate change during second half of XX century]. *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 2, pp. 35-42. (in Russ.)
4. Khokhlov, V.M., Latysh, L.H. & Tsymbaliuk, K.S. (2009). [Possible thermal condition changes in Ukraine in 2011-2025]. *Visnik Odes'kogo deržavnogo ekologičnogo universitetu [Bulletin of Odessa State Environmental University]*, 8, pp. 70-78. (in Ukr.)
5. Latysh, L.H. & Khokhlov, V.M. (2009). [Soil moisture content condition changes in Ukraine in 2011-2025]. *Fizychna heohrafiia ta heomorfologhiia [Physical Geography and Geomorphology]*, 57, pp. 43-49. (in Ukr.)
6. Khokhlov, V.M., Bondarenko, V.M. & Latysh, L.H. (2009). [Spatial distribution of precipitation anomalies in Ukraine in 2011-2025]. *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 5, pp. 54-62. (in Ukr.)
7. Khokhlov, V.M. & Yermolenko, N.S. [Future climate change and it's impact on precipitation and temperature in Ukraine]. *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 16, pp. 76-82. (in Ukr.) <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10>
8. 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.)
9. 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.)
10. 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.
11. Balabukh V. et al. (2018). [Projections of changes climatic mean and extreme parameters of thermal regime by the middle of the 21st century in Ukraine]. *Prirodopolzovaniye [Nature Management]*, 1, pp. 97-113. (in Russ.)
12. Krakovska, S.V. (2018). [Optimal ensemble of regional climate models for the assessment of temperature regime change in Ukraine]. *Prirodopolzovaniye [Nature Management]*, 1, pp. 114-126. (in Russ.)
13. 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>
14. El Hadri, Y. et al. (2019). Wind energy land distribution in Morocco in 2021–2050 according to RCM simulation of CORDEX-Africa project. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(24), Article 753. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4950-7>
15. Moss, R.H. et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, pp. 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
16. Loboda, N.S. et al. (2006). Using non-decimated wavelet decomposition to analyse time variations of North Atlantic Oscillation, eddy kinetic energy, and Ukrainian precipitation. *Journal of Hydrology*, 322(1-4), pp. 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.029>
17. Shevchenko, O. et al. (2014) Long-term analysis of heat waves in Ukraine. *International Journal of Climatology*, 34(5), pp. 1642-1650. <https://doi.org/10.1002/joc.3792>

## AIR TEMPERATURE AND PRECIPITATION REGIME IN UKRAINE IN 2021-2050 BY CORDEX MODEL ENSEMBLE

M. S. Zamfirova, V. M. Khokhlov

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

Global temperatures over the period of 2081–2100 are expected to rise by 0.3–4.8 °C compared to the period of 1986–2005. According to the previous studies, the average annual air temperature in all regions of Ukraine will keep increasing in the near future and the maximum increase in precipitation is expected mainly in the western and northern regions during winter and spring, whereas the decrease in precipitation will be registered in the central, eastern and southern regions during summer and autumn. This article aims to identify the features of changes in air temperature and precipitation for different regions of Ukraine in 2021–2050 based on the modelling results of the ensemble of CORDEX models as per the RCP4.5 scenario. 16 simulation runs for 7 regional climate models were selected for the analysis and the results were presented for five regional centers of Ukraine: Kyiv, Lviv, Kropyvnytskyi, Kharkiv and Odesa.

It is shown that future monthly precipitation in all regions tends to increase by an average of 20–40 mm during autumn, winter and spring, whereas the decrease is expected to occur in summer. According to some models, the monthly precipitation will be close to zero in the Southern Ukraine in July and August, which is typical for the Mediterranean climate. Compared to

the period of 1961–1990, the average monthly temperature will undergo small changes (up to 1 °C) in spring and autumn, while the temperature in summer and winter will increase by 2.5–3.5 °C. In Odesa, in contrast to the present-day situation, a positive average monthly air temperature will be expected to be recorded throughout the whole year, and only 25% of the runs show negative average monthly minimum temperatures. In the Northern Ukraine, the average monthly minimum and maximum temperatures in winter will increase by 2.0–2.5 °C, and in summer only the maximum air temperature will increase significantly.

Thus, we can assume a change in the regime of moisture supply in Ukraine over the next thirty years. One can also assume a high probability of snow cover absence throughout the whole winter in the Southern Ukraine as a result of positive temperatures.

**Keywords:** climate change; air temperature; precipitation; seasonal changes; CORDEX

## РЕЖИМ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ В УКРАИНЕ В 2021–2050 ГОДАХ ПО ДАННЫМ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЕЙ CORDEX

М. С. Замфирова, В. Н. Хохлов

ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [khokhlovv@odeku.edu.ua](mailto:khokhlovv@odeku.edu.ua)  
<https://orcid.org/0000-0001-8315-8636>

Для периода 2081–2100 годов по сравнению с 1986–2005 годами ожидается повышение глобальной температуры на 0,3–4,8 °C. По результатам предыдущих исследований, в ближайшем будущем среднегодовая температура воздуха во всех регионах Украины будет увеличиваться, а максимальное увеличение количества осадков ожидается преимущественно в западном и северном регионах зимой и весной, и уменьшение – в центральном, восточном и южном регионах летом и осенью. Целью этой статьи является выявление особенностей изменений температуры воздуха и осадков для различных регионов Украины в 2021–2050 годах по результатам моделирования ансамбля моделей CORDEX по сценарию RCP4.5. Для анализа были отобраны 16 симуляций 7 региональными климатическими моделями и результаты представлены для пяти областных центров Украины – Киева, Львова, Кропивницкого, Харькова и Одессы.

Показано, что будущие месячные суммы осадков во всех регионах имеют тенденцию к увеличению в среднем на 20–40 мм в течение осени, зимы и весны, а летом ожидается их уменьшение. На юге Украины по некоторым моделям в июле и августе осадки будут близки к нулю, что характерно для средиземноморского климата. По сравнению с 1961–1990 годами, небольшие изменения претерпевает среднемесячная температура воздуха весной и осенью (до 1 °C), тогда как увеличение температуры летом и зимой составит 2,5–3,5 °C. В Одессе, в отличие от настоящего периода, ожидается положительная среднемесячная температура воздуха в течение всего года, и только 25% симуляций показывают отрицательные среднемесячные минимальные температуры. На севере Украины рост среднемесячной минимальной и максимальной температуры зимой составит 2,0–2,5 °C, а летом существенно повышаться будет только максимальная температура воздуха.

Таким образом, можно предположить изменение характера влагообеспеченности территории Украины в ближайшие тридцать лет. Также можно предположить большую вероятность отсутствия снежного покрова в течение всей зимы на юге Украины в результате положительных температур.

**Ключевые слова:** изменения климата; температура воздуха; осадки; сезонный ход, CORDEX

Подання до редакції : 16. 03. 2020  
Надходження остаточної версії : 19. 04. 2020  
Публікація статті : 03. 07. 2020

УДК:551.509:551.558.1

## НИЖНЬОРІВНЕВА АДВЕКЦІЯ ВОЛОГИ ЯК ТРИГЕРНИЙ МЕХАНІЗМ АТМОСФЕРНОЇ КОНВЕКЦІЇ ТА ПРЕДИКТОР ЇЇ ПРОГНОЗУ

Міщенко Н. М., Панова Я. Л., Грушевський О. М.

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [natalimishchenko@gmail.com](mailto:natalimishchenko@gmail.com)

Прогноз конвективних явищ в оперативній практиці метеопідрозділів здійснюється на підставі даних радіозондування атмосфери за 00 та 12 СГЧ, які дозволяють одержати низку кількісних характеристик атмосферної конвекції. Зокрема, аналіз повторюваності різних градацій індексу CAPE (Convective Available Potential Energy) для випадків утворення грози, який найчастіше використовується для прогнозу конвективних явищ, свідчить, що найбільшу повторюваність мають градації, які не дають достатніх підстав для прогнозу наявності конвективних явищ. Цей підхід має низьку ефективність через неможливість відстеження динаміки змін структури метеовеличин у шарі конвекції. На відміну від розподілу повторюваності градацій індексу CAPE, аналіз повторюваності індексу CIN (Convective Inhibition) у випадках утворення грози свідчить, що найбільші її значення припадають на діапазон, який характеризує сприятливі умови для утворення конвективних явищ. Таким чином, індекс CIN за даними радіозондування атмосфери у 00 СГЧ має більшу прогностичну значимість ніж індекс CAPE.

Можливість збільшення величини енергії нестійкості після 00 СГЧ при формуванні грози продемонстровано на підставі даних радіозондування атмосфери з 6-ти годинним інтервалом. Це актуалізує необхідність діагнозу та прогнозу процесів, які зумовлюють таке зростання. У статті розглянутий спосіб поєднання даних радіозондування з даними чисельного моделювання для прогнозу глибокої конвекції. Зокрема, продемонстровано, що такий тригерний механізм, як нижньорівнева адвекція вологи зумовлює реалізацію умови нелокальної нестійкості атмосфери NcI. У розглянутих випадках адвекція вологи у граничному шарі атмосфери або передують або супроводжують грозову діяльність. Інтенсивність адвекції вологи та її тривалість чинять прямий вплив на інтенсивність та тривалість гроз. Найбільш показовими рівнями нижньорівневої адвекції вологи для «запуску» гроз є рівні 975 та 925 гПа. Ініціалізація грозової діяльності через адвекцію вологи у граничному шарі атмосфери представлена на схемі, яка наочно її демонструє.

Важливо, що зазначений механізм може бути діагностований за прогностичними даними GFS і використаний для прогнозу інтенсивності та тривалості конвективних явищ.

**Ключові слова:** атмосферна конвекція, індекси нестійкості, нелокальна нестійкість, адвекція вологи, дані чисельного моделювання, грозова діяльність, тригерні механізми, тривалість гроз.

### 1. ВСТУП

Атмосферна конвекція є явищем погоди, якому завжди буде приділятися особлива увага дослідників. Причини цього неважко зрозуміти ознайомившись зі спектром потенційних наслідків, які зумовлюють конвективні явища. Надзвичайно широке коло споживачів, зацікавлених у завчасному надходженні інформації про такі явища як гроза, град, шквал, раптові підтоплення, торнадо, тощо, спонукає дослідників до пошуку нових, якомога ефективніших методів їх прогнозування.

Метою дослідження є ідентифікація окремих

тригерних механізмів конвекції і оцінка можливості їх використання в якості предикторів інтенсивної конвективної діяльності.

### 2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Варто зауважити, що цифри, що характеризують збитки від атмосферної конвекції, дійсно вражають. Наприклад, у 2017 році, збитки лише від граду на території США становили близько 1 мільярда доларів [1]. За даними NOAA, у 2011 році, який став рекордним за наслідками конвективної діяльності, загинуло більше 550 людей, а загальні збитки склали 28 міль-

ярдів доларів [2].

Територія України не є виключенням і також зазнає відчутних збитків внаслідок конвективної діяльності, проте систематизовані дані про них відсутні. Як правило, у повідомленнях в ЗМІ обмежуються констатацією наслідків негоди, зрідка наводиться приблизний обсяг збитків. У кості найбільш яскравих прикладів можна навести грозу 28. 07. 2016 року на Закарпатті, коли було пошкоджено майже 8 тисяч будинків, 14 закладів охорони здоров'я та 35 закладів освіти у 76 населених пунктах, постраждали 1200 гектарів сільськогосподарських угідь, зруйновані дороги місцевого значення. Загальна сума збитків становила близько 88 мільйонів гривень [3]. Заслужують на увагу наслідки потужного конвективного шторму 29. 06. 2018 р. на Дніпропетровщині, коли внаслідок грози були відімкнені від електропостачання 212 населених пунктів (з них частково 69), знеструмлені 1433 трансформаторних підстанцій, які обслуговували 66 тисяч абонентів. У цей же день на Волині зруйновано понад півсотні приватних будинків та 36 об'єктів інфраструктури. У Чернівецькій області вітер зніс дахи із двох десятків приватних будинків та 13 інфраструктурних об'єктів [4].

Наразі методика прогнозування конвективних явищ в Україні базується на використанні комплексного підходу, який полягає у прогнозі синоптичного положення, яке сприяє (або не сприяє) розвитку конвекції, використанні даних чисельного моделювання кількості конвективної хмарності та опадів і розрахунку обмеженої кількості параметрів конвекції. Головне джерело даних для понадкороткострокового прогнозу конвективних явищ – дані температурно-вітрового зондування – має відповідати просторово-часовому інтервалу конвекції, проте наявна мережа аерологічних станцій на території України та періодичність зондування не задовольняють цим вимогам. Дворазове (00 та 12 СГЧ) радіозондування атмосфери проводиться лише на ст. Київ (33345), а денне (на момент максимального розвитку конвекції), крім неї, ст. Кривий Ріг (33791) та Шепетівка (33317). Крім того, що це суттєво знижує точність прогнозування і унеможливорює обґрунтовану деталізацію прогнозу (зокрема, що стосується часу виникнення, інтенсивності та тривалості шторму), це, на додачу, породжує дефіцит даних, збір, аналіз та систематизація яких у оперативних метеопідрозділах мають проводитися постійно з метою адаптації наявних критеріальних значень кількісних показників атмосферної конвекції до конкретного

пункту. Застосування методів наукастингу, які, насамперед, базуються на даних радарних спостережень і супутникового моніторингу, має один суттєвий недолік – вони не забезпечують бажаної завчасності для споживача, що суттєво нівелює ефективність їх використання (наприклад, у комунальній сфері). Певні сподівання на Заході зараз покладаються на розвиток поляриметричних методів спостережень, які, як планується до кінця 20-х років цього століття, дозволять розширити спектр вирішуваних завдань (наприклад, розділяти області штормів за типами частинок) [5,6].

### 3. ОПИС ОБ'ЄКТА І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Окреслене коло проблем актуалізує необхідність підвищення ефективності прогнозів конвективної діяльності над територією України навіть з урахуванням наявної інформації. У цьому сенсі ідентифікація прогностичних ознак, які «сигналізують» про можливість виникнення глибокої конвекції, є актуальним завданням.

Стосовно прогнозу конвекції важко виділити пріоритетні ознаки через досить широке коло процесів, які впливають на її розвиток і, найголовніше, на інтенсивність та тривалість. Завдання ускладнюється й тим, що зазначені процеси діють на різних часових інтервалах і просторових масштабах і можуть «просіюватися» стандартними методами спостережень. Саме тому, задача прогнозування конвективних явищ (особливо в умовах дефіциту даних) полягає у максимально точному врахуванні і параметризації тих процесів, які впливають на їх розвиток, а проведення аналізу цих процесів є можливим і ефективним.

*Характеристика вихідних даних і «стартові умови».* Для проведення дослідження залучались дані радіозондування атмосфери у пункті Київ (33345) за строки 00 та 12 СГЧ, Одеса (33837), Львів (33393), Кривий Ріг (33791) за строки 00 ГЧ за теплі періоди (з квітня по вересень включно) 2016-2018 рр. Крім них залучались дані чисельного моделювання GFS для вузла RST з координатами 50,5° пн.ш., 30,5° сх.д.

Протягом вказаного періоду було відібрано 62 випадки утворення гроз над вказаним пунктом. Для кожного з них у дні з наявністю грози з використанням програмного забезпечення RAOB (The universal RAwinsonde-OBServation program. Універсальна програма спостереження за радіозондом) розраховувалися значення індексів CAPE і CIN для різних типів адіабатичного підйому частинки (*Surface Based CAPE*

(*SBCAPE*), *Mean - Layer CAPE (MLCAPE)* та *Most Unstable CAPE (MUCAPE)*).

При визначенні величин *CAPE* та *CIN* для *SB* типу підйому вплив інверсій не враховувався, оскільки у переважній більшості випадків радіаційні інверсії не чинять впливу на розвиток конвекції, внаслідок їх швидкої руйнації після сходу Сонця.

Для *ML* типу підйому кількісне значення товщини шару перемішування задавалося апіорі  $ДН_{ML} = 30$  гПа, і для випадків зондування як за 00 СГЧ, так і 12 СГЧ не змінювалося. Це певним чином порушує «фізичність» процесу для радіозондування за 12 СГЧ, проте видається найоптимальнішим підходом з урахуванням факту утворення більшості випадків грози до зазначеного терміну.

Для реалізації *MU* типу підйому розглядався 300-мілібаровий шар від ізобари приземного тиску до рівня, на якому тиск зменшується на вказану величину. Підйом частинки і розрахунок значень *CAPE* і *CIN* здійснювався автоматично через кожні 10 мб.

#### 4. ОПИС І АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Згідно з загальноприйнятою технікою прогнозування конвективних явищ, після встановлення факту сприятливості синоптичної ситуації для розвитку конвекції, оцінюється тип стратифікації атмосфери, кількісним виразом якого є індекс *CAPE*. Враховуючи, що з семи наявних аерологічних станцій в Україні дворазове зонду-

вання атмосфери, як зазначалося вище, забезпечує лише ст. Київ, висновок про можливість ініціалізації конвекції у переважній більшості пунктів прогнозу формулюється на підставі даних зондування за 00 СГЧ.

На рис. 1 представлені діаграми залежності між індексами *CAPE* та *CIN* для трьох типів підйому частинки – *SB*, *ML* та *MU* для випадків утворення грози.

З них видно, що значення *CAPE* переважно знаходяться у межах діапазонів від 0 до 1500 Дж/кг для *SB* та *MU* типів підйому, від -100 до 1000 Дж/кг – для *ML* типу підйому. При цьому *CAPE* зі значеннями понад 2000 Дж/кг спостерігається лише у 6 % випадків.

Детальніший аналіз діапазону розсіювання *CAPE* (рис. 2) свідчить, що сумарна повторюваність градацій 0 - 1000 та 1000 - 2000 Дж/кг становить 92,9 % від загальної кількості випадків утворення гроз. На значення *CAPE* > 2000 Дж/кг припадає лише 7,0 % випадків (по 4,2 % та 2,8 % на градації 2000 - 3000 та 3000 - 4000 Дж/кг відповідно).

Аналогічний до *SB* типу підйому розподіл повторюваності (рис. 2) спостерігається і для *MU* типу підйому – майже 90,3 % випадків припадає на перші дві градації, що зумовлює певне збільшення повторюваності (до 6,9 %) градації 2000-3000 Дж/кг, що є цілком закономірним з огляду на алгоритм розрахунку *CAPE* для цього типу підйому частинки.

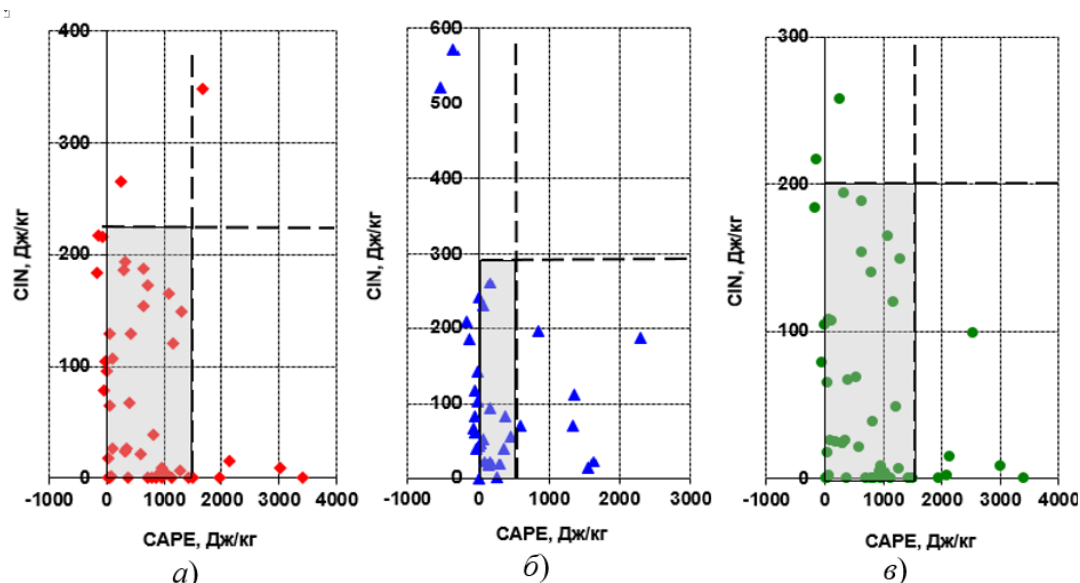


Рис. 1 – Діаграми залежності між індексами *CAPE* та *CIN* для *SB* (а), *ML* (б) та *MU* (в) типів підйому

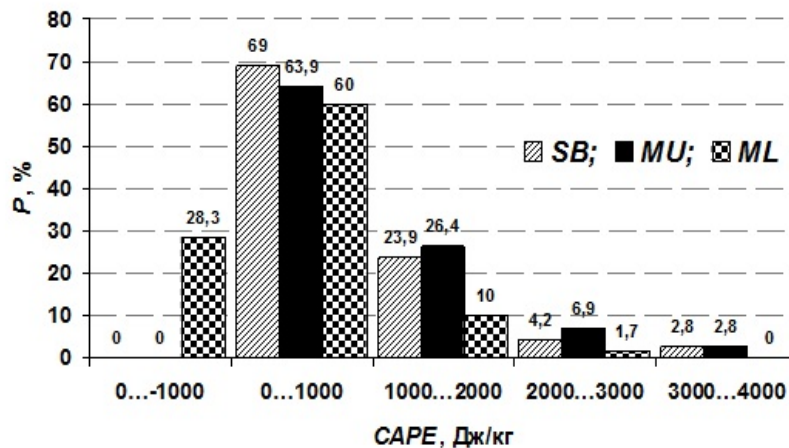


Рис. 2 – Повторюваність градацій  $CAPE$  для  $SB$ ,  $MU$  та  $ML$  типів адиабатичного підйому частинки у випадках формування грози на ст. Київ, Одеса, Львів, Кривий Ріг за теплі періоди 2016 - 18 рр.

$ML$  тип підйому (рис. 2 б) зумовлює виникнення діапазону  $CAPE$  з від'ємними значеннями, повторюваність якого становить 28,3 %. Формування цього діапазону значень відбувається за рахунок зникнення повторюваності діапазону 3000-4000 Дж/кг та суттєвого зменшення повторюваності двох інших діапазонів. Таким чином, врахування осереднених характеристик нижнього шару атмосфери, що збільшує, як зазначалося вище, «фізичність» процесу (особливо з урахуванням строків одержання даних), нашою виводить висновок, що в період проведення зондування у переважній більшості випадків (88,3 % випадків) атмосфера не характеризується достатніми запасами енергії нестійкості для реалізації глибокої конвекції.

Для перших двох типів підйому повторюваність значень індексу  $CAPE < 1000$  Дж/кг, які не свідчать про імовірність виникнення конвекції (або свідчать про можливість слабкої конвекції), коливається у межах 60-70 %.

Наведені цифри красномовно вказують на те, що прогноз інтенсивної конвективної діяльності на підставі кількісної оцінки енергії нестійкості за даними радіозондування мережі аерологічних станцій України у переважній більшості випадків забезпечить «помилку пропуску».

Таким чином, у прогнозі конвективних явищ мають враховуватися інші чинники, які збільшують запаси енергії нестійкості атмосфери на часовому проміжку від 6 до 12 годин і здатні «запустити» конвекцію.

У [6], застосовуючи поняття нелокальної умовної нестійкості ( $NcI$ ), наголошується на необхідності врахування процесу, коли тепле вологе атмосферне повітря граничного шару обмежується шаром інверсії або стійко страти-

фікованого повітря, вище якого знаходиться відносно холодне, нестійке повітря.

Зазначений шар затримує тепле вологе повітря поблизу землі, що дозволяє накопичувати приховану теплову енергію, коли сонце нагріває підстильну поверхню та зумовлює випаровування. Без цієї «кришки» конвекція виводитиме тепле вологе повітря з граничного шару, без можливості накопичення достатньої енергії для виникнення грози.

«Нелокальність» полягає у тому, що повітря, розташоване нижче затримуючого шару, стає нестійким вище нього, а «умовність» – у можливості реалізації запасів  $CAPE$  шляхом руйнації затримуючого шару повітрям, яке піднімається, внаслідок певних процесів.

Найпоширенішою параметризацією зазначеної вище «кришки» є індекс  $CIN$ , градації якого ми визначимо наступним чином – 1-50; 50-100; 100-150; 150-200; 200-300; 300-400 та 400-600 Дж/кг. Крім цього, ми відокремимо випадки зі значенням  $CIN = 0$ , оскільки це унеможливило б реалізацію процесу нелокальної умовної нестійкості.

З рис. 3 видно, що найбільшу повторюваність має діапазон значень від 1 до 50 гПа, що узгоджується з результатами, одержаними у роботах [7, 8]. Характерно, що на діапазони значень від 5 до 200 Дж/кг припадає 64,5 %, 69,7 та 78,3 % випадків для  $SB$ ,  $MU$  та  $ML$  типів підйому відповідно. Це також узгоджується з даними, наведеними у роботі [7] і створює передумови для реалізації умовної нелокальної нестійкості. Зокрема, випадки зі значеннями  $CIN = 0$  мають повторюваність по 26 % для  $SB$  та  $ML$  типів підйому, проте для  $MU$  типу його повторюваність складає лише близько 3 %.

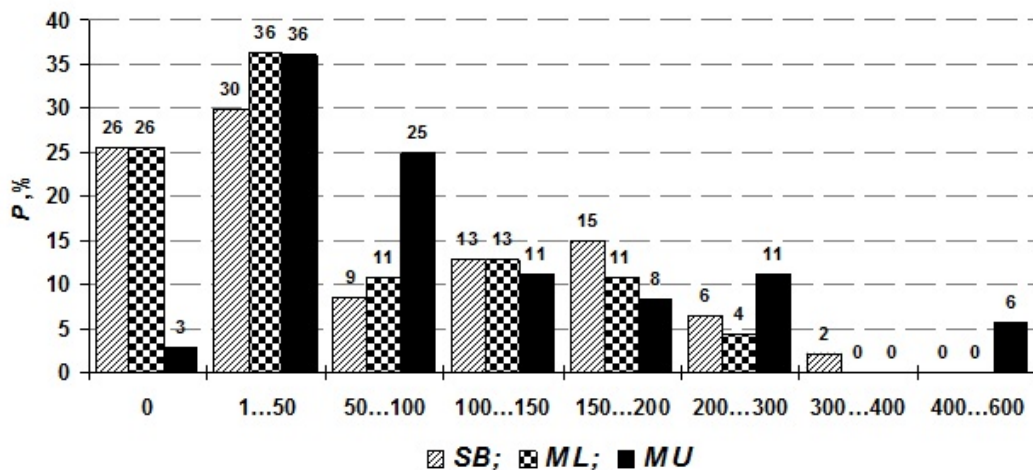


Рис. 3 – Повторюваність градацій CIN у випадках формування грози на ст. Київ

Це свідчить, що за результатами радіозондування значення індексу CIN, на відміну від значень CAPE, у більшості випадків дають уявлення про наявність потенціалу розвитку конвекції у дні з грозою.

Розглянемо механізм і часовий масштаб реалізації нелокальної умовної нестійкості для чого залучимо дані 4-разового протягом доби радіозондування атмосфери на ст. Штутгарт (10739) у день, коли спостерігалася злива з грозою. Для одержання кількісних значень індексів CAPE та CIN ML-тип підйому (DNML = 100 мб) застосовувався для строків 00 та 06 СГЧ, для двох наступних строків – 12 та 18 СГЧ – з метою врахування денного турбулентного перемішування в ГША застосовувався SB-тип підйому. Аналіз часової еволюції зазначених індексів (рис. 4) свідчить, що стійка стратифікація атмосфери з 00 до 06 СГЧ змінює знак, а протягом наступних 6 годин генерується «вибухова» конвекція з паралельною руйнацією затримуючого шару.

З аналізу цього процесу на аерологічній діаграмі (рис. 5) видно, що зменшення площі індексу CIN за 06 СГЧ (рис. 5 б) відбувається на фоні зменшення дефіцитів точки роси у ГША. Таким чином, можна припустити, що це, певною мірою, впливає на збільшення енергії нестійкості та руйнацію затримуючого шару оскільки температура та вологість повітря є визначальними складовими у формуванні конвективних явищ. Але їх «моментальна» оцінка за даними радіозондування у більшості випадків не буде показовою, оскільки не характеризуватиме тенденцію змін метеовеличин, що впливають на еволюцію конвекції.

Тому для коректнішої оцінки залучимо величину адвекції питомої вологи повітря, яку за

прогностичними даними GFS визначимо за формулою

$$A_f = - \left( u \frac{\delta q}{\delta x} + v \frac{\delta q}{\delta y} \right),$$

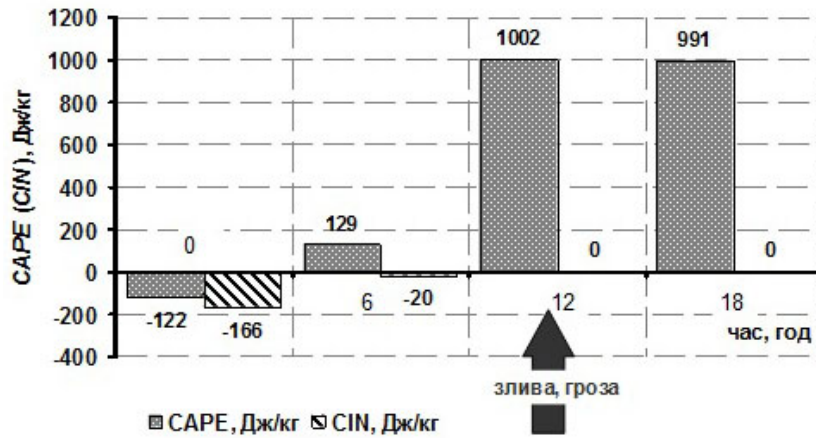
де  $u, v$  – складові швидкості вітру;

$\delta x, \delta y$  – крок РСТ по широті та довготі,  $\delta x = 2,7 \cdot 10^{-4}$  м,  $\delta y = 2,7 \cdot 10^{-4}$  м;  $q$  – питома вологість повітря, г/кг.

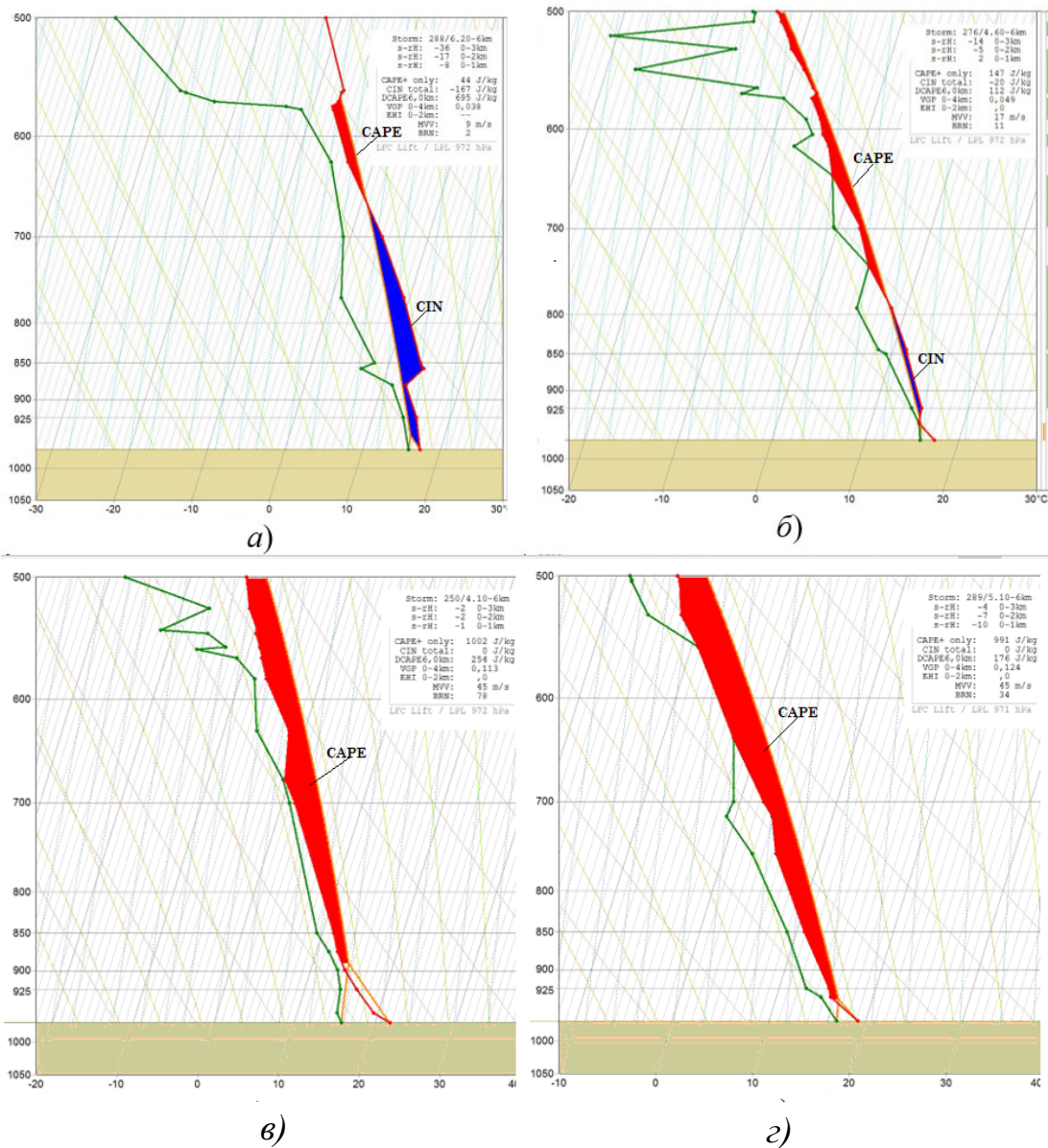
Зауважимо, що інтенсивне надходження вологи на нижніх рівнях є одним з тригерних механізмів конвекції, який дозволяє подолати теплому і вологому повітрю шари з від'ємними значеннями енергії плавучості. Тому прогноз вертикальної структури і часового ходу адвекції вологи має виступати інформативним предиктором розвитку конвекції (особливо в період інтенсивного денного прогріву підстильної поверхні).

Для наочності залучимо дані трьох днів з грозою на ст. Київ 27. 07. 17 р., 28. 06. 16 р. та 30. 05. 17 р. Два перші випадки (рис. 6 а, б) характеризуються слабкою адвекцією вологи, третій – інтенсивним надходженням вологи до граничного шару атмосфери (рис. 6 в).

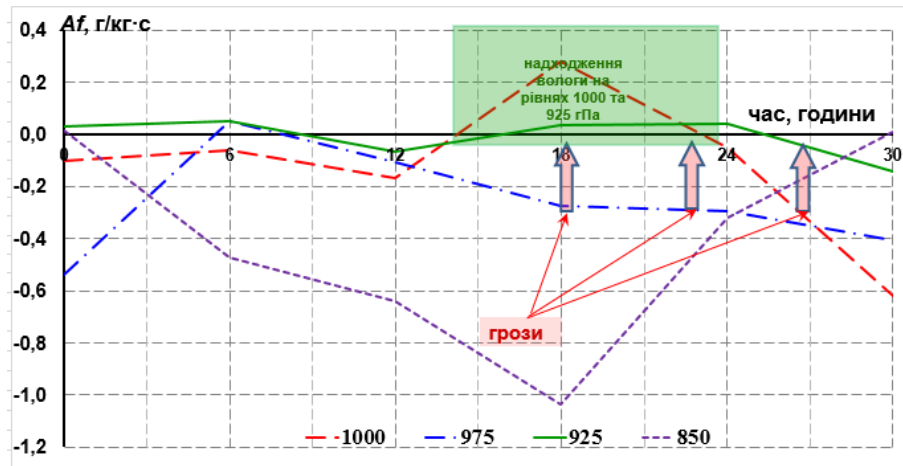
Для першого випадку за прогностичними даними GFS (рис. 6 а) представлений часовий хід адвекції питомої вологості повітря у граничному шарі атмосфери, коли за строки 14, 17 та 20 СГЧ відзначалася гроза. Їй передувала слабка адвекція вологи на рівнях 975 та 925 гПа ( $\approx 0,05$  г/кг·с), яка в період грози спостерігалася на рівнях 1000 гПа ( $\approx 0,3$  г/кг·с) та 925 гПа ( $\approx 0,05$  г/кг·с). Вертикальні профілі адвекції вологи (рис. 6а) показують її додатні значення у шарі 990 - 925 гПа о 06 год. та о 18 год. на фіксованих рівнях – 1000 та 925 гПа.



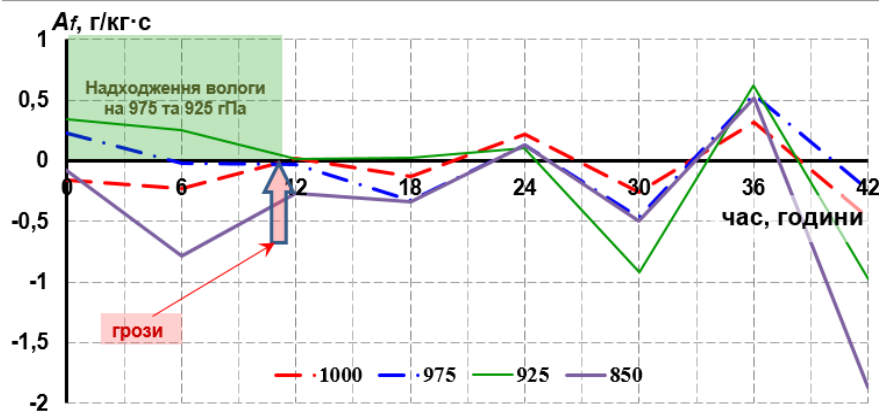
**Рис. 4** – Часова еволюція індексів  $CAPE$  та  $CIN$  за даними радіозондування атмосфери на ст. Штутгарт (10739) 12. 06. 2018 р. Стрілкою позначений час, коли спостерігалися зазначені на рисунку явища погоди.



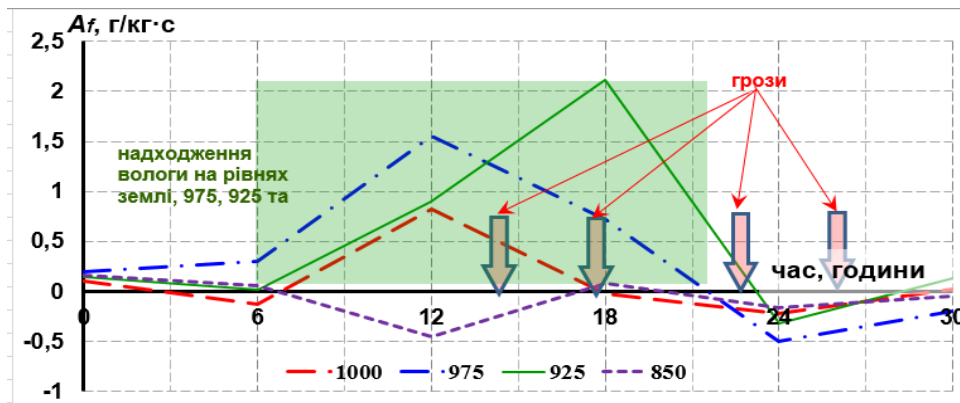
**Рис. 5** – Графічне відображення індексів  $CAPE$  та  $CIN$  у нижній половині тропосфери за даними радіозондування атмосфери на ст. Штутгарт (10739) 12. 06. 2018 р. за 00 (а), 06 (б), 12 (в) та 18 СГЧ (г).



а)



б)



в)

Рис. 6 – Часовий хід адвекції питомої вологи ( $A \times 10^{-4}$  г/кг·с) за 27. 07. 2017 р. (а), 30. 05. 17 р. (б) та 28. 06. 16 р. (в) на станції Київ (за даними вузла РСТ з координатами 50,5° пн. ш 30,5° сх. д.)

Відмінною особливістю випадку є зміна знаку адвекції протягом 5 годин (з 09 по 14 год.) перед грозою, коли у всій товщі ГША спостерігалася від'ємні значення адвекції вологи.

Утворення грози 30. 05. 17 р. (рис.6 б) відбувалося в умовах ідентичних першому випадку – до початку грози спостерігалася слабка адвекція вологи на рівнях 975 та 925 гПа (від 0,1 до

0,34 г/кг·с), яка сприяла утворенню грози. На вертикальних профілях (рис. 6б) спостерігається адвекція вологи у шарі 990 - 860 гПа (за 00 СГЧ) та у шарі 975 - 910 гПа (за 06 СГЧ). При цьому зміна знаку адвекції зумовила короточасність грози – грозові розряди мали разовий характер і у подальшому не повторювалися.

У третьому випадку (рис. 6 в) часовому ходу

адвекції вологості притаманні ті ж особливості, що й у попередніх випадках – слабка адвекція вологи у шарі 975-925 гПа перед утворенням грози та її посилення безпосередньо в час, коли вона спостерігалася. Відмінною рисою випадку є інтенсивність цієї адвекції (до 1,5-2,2 г/кг·с) у ГША та товщина шару охоплення (від землі до 925 гПа). Це зумовило збільшення тривалості періоду існування грозової діяльності і посилення її інтенсивності.

Таким чином, для розглянутих випадків спільним фактором утворення грози є наявність адвекції вологи у ГША. Схематично цей процес можна відобразити так, як це зроблено на рис. 7. Тобто, реалізація «умовної нелокальної нестійкості» відбувається на фоні адвекції вологи у ГША (поблизу рівня 925 гПа), яка спрацьовує як тригерний механізм утворення грози.

## 5. ВИСНОВКИ

При реалізації тригерного механізму грози через нижньорівневу адвекцію вологи її надходження до ГША може спостерігатися як до початку грози (протягом періоду від 6 до 12 годин), так і в період грозової діяльності, що впливає на її тривалість. При цьому часовий масштаб руйнації затримуючого шару (CIN) становить близько 6 годин, тобто є процесом одного часового масштабу.

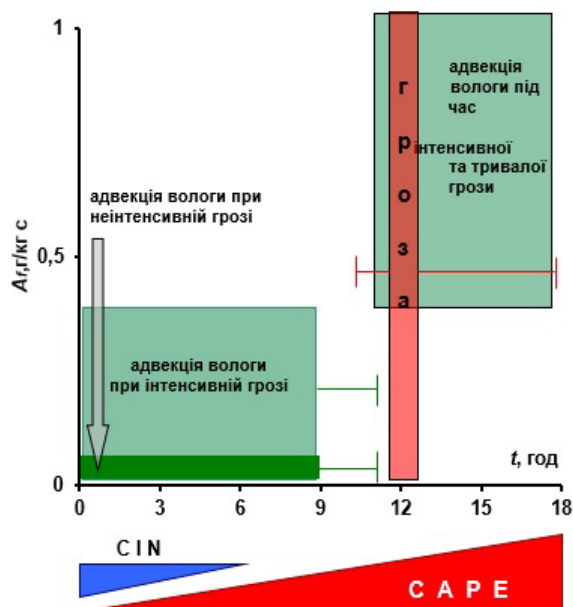


Рис. 7 – Схема утворення грози при адвекції вологи нижніх рівнів.

На осі ординат позначений час від проведення радіозондування атмосфери у 00 СГЧ. «Вуса» позначають діапазон змін тривалості адвекції вологи та грози.

Необхідною умовою утворення грози в усіх розглянутих випадках є надходження вологи приблизно на висоті рівня конденсації ( $LCL$ ), що підтверджується її часовими змінами на рівні 925 гПа.

Інтенсивність адвекції вологи є визначальним чинником інтенсивності грози. Тривалі і інтенсивні грози відбуваються на фоні нижньорівневої адвекції вологи, інтенсивність якої у 2 - 2,5 рази перевершує аналогічний показник при слабких грозах. В розглянутих випадках припинення адвекції вологи зумовлює закінчення грозової діяльності.

При прогнозі можливості утворення грози доцільно враховувати інтенсивність та тривалість адвекції вологи у ГША – її наявність протягом 6 - 12 годин перед прогріванням підстильної поверхні є ознакою збільшення імовірності грозової діяльності, а продовження після 12 СГЧ – ознакою збільшення тривалості грози. Використання її прогностичних даних у ГША дозволить істотно підвищити точність і обґрунтованість прогнозу конвективних явищ.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. What Kind of Damage Do Thunderstorms Cause? Sciencing. URL: <https://sciencing.com/kind-damage-do-thunderstorms-cause-7462714.html>. (Accessed: 09.05.2019)
2. Severe Thunderstorms and Tornadoes in the United States. December 2, 2008. May 22, 2013. R40097. URL: <https://www.everycrsreport.com/reports/R40097.html> (Accessed: 12. 10. 2019 p.).
3. Наслідки страшно грози на Закарпатті: Майже 8 тисяч пошкоджених будинків та 88 мільйонів збитків. URL: <http://uzhgorod.net.ua/news/97640>. (дата звернення: 24. 12. 2019 p.).
4. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2018 році. URL: <https://www.dsns.gov.ua/files/2019/1/18/321/%D0%9F%D1%83%D0%B1%D0%BB%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%82%20%D0%B7%D0%B0%202018%20%D1%80%D1%96%D0%BA.pdf>. (дата звернення: 08. 07. 2019 p.).
5. Enrique V. Mattos, Luiz. T. Machado, Earle R. Williams, Rachel I. Albrecht. Polarimetric radar characteristics of storms with and without lightning activity. *Advancing Earth and space science publications. JGR Atmospheres*. Online ISSN: 2169 - 8996. 2016. Vol. 125. Pp. 201 - 220. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016JD025142>.
6. Vera Meyer. Thunderstorm Tracking and Monitoring on the Basis of Three-Dimensional Lightning Data and Conventional and Polarimetric Radar Data. 2010. p. 30-37. URL: [https://edoc.ub.uni-muenchen.de/12102/1/Meyer\\_Vera.pdf](https://edoc.ub.uni-muenchen.de/12102/1/Meyer_Vera.pdf). (Accessed: 29. 01. 2020)
7. Stull R. Practical Meteorology : An algebra-based survey of atmospheric science. University of British Columbia, 2016.
8. Про можливості діагнозу і прогнозу глибокої конвекції у оперативній діяльності / Грушевський О. М., Міцен-

ко Н. М., Мансарлійський В. Ф. та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 5 - 15. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.01>

## REFERENCES

1. *What Kind of Damage Do Thunderstorms Cause? Sciencing*. Available at: <https://sciencing.com/kind-damage-do-thunderstorms-cause-7462714.html>. (Accessed: 09.05.2019)
2. *Severe Thunderstorms and Tornadoes in the United States. December 2, 2008. May 22, 2013. R40097*. Available at: <https://www.everycrsreport.com/reports/R40097.html> (Accessed: 12. 10. 2019 p.).
3. *Naslidky strashnoi hrozy na Zakarpatti: Maizhe 8 tysiach poshkodzhennykh budynkiv ta 88 milioniv zbytkiv [Consequences of a terrible thunderstorm in Transcarpathia: Nearly 8,000 damaged homes and 88 million damage]*. Available at: <http://uzhgorod.net.ua/news/97640>. (Accessed: 24. 12. 2019). (in Ukr.)
4. *Zvit pro osnovni rezultaty diialnosti Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii u 2018 rotsi [Report on the Main Results of the State Emergency Service of Ukraine in 2018]*. Available at: <https://www.dsns.gov.ua/files/2019/1/18/321/%D0%9F%D1%83%D0%B1%D0%BB%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%82%20%D0%B7%D0%B0%202018%D1%80%D1%96%D0%BA.pdf>. (Accessed: 08. 07. 2019). (in Ukr.)
5. Enrique V., Mattos, Luiz A.T., Machado, Earle R., Williams, Rachel I., Albrecht. (2016). Polarimetric radar characteristics of storms with and without lightning activity. *Advancing Earth and space science publications. JGR Atmospheres*. Online ISSN: 2169 – 8996, 125, pp. 201 - 220. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016JD025142>.
6. Vera, Meyer. (2010). *Thunderstorm Tracking and Monitoring on the Basis of Three-Dimensional Lightning Data and Conventional and Polarimetric Radar Data*, pp. 30-37. Available at: [https://edoc.ub.uni-muenchen.de/12102/1/Meyer\\_Vera.pdf](https://edoc.ub.uni-muenchen.de/12102/1/Meyer_Vera.pdf). (Accessed: 29. 01. 2020).
7. Stull, R. (2016). *Practical Meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science*. University of British Columbia.
8. Hrushevskiy, O.M. et al. (2018). On the structure of the dynamic features of the lower layer of the atmosphere in the presence of low cloudiness. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 22, pp. 5-15. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.01> (in Ukr.)

## LOW-LEVEL MOISTURE ADVECTION AS A TRIGGER MECHANISM FOR ATMOSPHERIC CONVECTION AND A PREDICTOR OF ITS FORECAST

N.M. Mishchenko, Y.L. Panova., O.M. Hrushevskiy

Odessa State Environmental University, 15,  
Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, [natalimishchenko@gmail.com](mailto:natalimishchenko@gmail.com)

The convective phenomena forecast in the operational practice of meteorological units is made on the basis of radiosonde data for 00 and 12 GMT allowing to obtain a number of quantitative characteristics of atmospheric convection. Particularly, the frequency analysis of different gradations of CAPE (Convective Available Potential Energy) index for the cases of thunderstorms, the one that is most commonly used for the forecast of convective phenomena, shows that the highest frequencies are associated with the gradations that do not provide sufficient grounds for the forecast of convective phenomena availability. This approach is of low efficiency due to the inability of tracking the dynamics of changes in the meteorological values' structure across the convection layer. In contrast to the distribution of CAPE index gradation frequencies, the frequency analysis of CIN (Convective Inhibition) index for the cases of thunderstorms shows that its largest values fall within the range characterizing the favourable conditions for convective phenomena. Thus, according to the radiosonde data in 00 GMT, CIN index has a greater predictive significance than CAPE index.

The possibility of increasing the lability energy magnitude after 00 GMT during thunderstorms formation was demonstrated on the basis of radiosonde data with 6-hour interval. This actualizes the need for diagnosis and forecast of the processes contributing to such growth. The article describes the way in which radiosonde data may be combined with the numerical simulation data in order to forecast deep convection. In particular, it shows that such trigger mechanism, a low-level moisture advection, contributes to realization of nonlocal conditional instability of atmosphere NcI.

In the reviewed cases, the moisture advection in the atmospheric boundary layer either precedes or accompanies the thunderstorm activity. The intensity of moisture advection and its duration have a direct impact on the intensity and duration of thunderstorms. The most prominent levels of low-level moisture advection to "start" the thunderstorm are 975 and 925 hPa levels. The initialization of thunderstorm activity through moisture advection in the atmospheric boundary layer is shown on the diagram clearly demonstrating it.

It is important that this mechanism can be diagnosed based on GFS predicted data and used to

forecast the intensity and duration of convective phenomena.

**Key words:** atmospheric convection, instability indexes, nonlocal instability, moisture advection, numerical simulation data, thunderstorm activity, trigger mechanisms, duration of thunderstorms.

## НИЖНЕУРОВЕННАЯ АДВЕКЦИЯ ВЛАГИ КАК ТРИГГЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ АТМОСФЕРНОЙ КОНВЕКЦИИ И ПРЕДИКТОР ЕЕ ПРОГНОЗА

Мищенко Н. М., Панова Я. Л., Грушевский О. Н.

Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [natalimishchenko@gmail.com](mailto:natalimishchenko@gmail.com)

Прогноз конвективных явлений в оперативной практике метеоподразделений осуществляется на основе данных радиозондирования атмосферы за 00 и 12 СГВ, которые позволяют получить ряд количественных характеристик атмосферной конвекции. При этом, как показано, такой подход имеет низкую эффективность из-за невозможности отслеживания динамики изменений структуры метеовеличин в слое конвекции. Это обусловлено, в первую очередь, временной дискретностью исходных данных. Величина индекса CAPE, являющегося основополагающим при прогнозировании конвективных явлений в оперативных метеоподразделениях, может претерпевать существенные изменения в период между сроками зондирования атмосферы. Такие изменения могут быть диагностированы или спрогнозированы либо за счет проведения учащенных радиозондирований атмосферы, либо с использованием прогностических данных.

В представленной статье рассмотрен способ объединения данных радиозондирования с данными численного моделирования для прогноза глубокой конвекции. На основании данных учащенного зондирования атмосферы в дни с грозовой деятельностью показано, что временной масштаб реализации условной нелокальной неустойчивости составляет несколько часов. Одним из механизмов «запуска» конвекции является адвекция влаги в пограничном слое атмосферы. В частности, в рамках предложенного подхода продемонстрировано, что этот тригерный механизм может быть диагностирован и использован для прогноза интенсивности и продолжительности конвективных явлений. В рассмотренных случаях продолжительность гроз была напрямую связана с продолжительностью грозовой деятельности. Структура прогностических данных, использовавшихся в исследовании, позволяет с приемлемой заблаговременностью спрогнозировать возможность реализации такого триггерного механизма глубокой конвекции, что существенно повышает эффективность прогноза конвективных явлений в оперативной деятельности.

**Ключевые слова:** атмосферная конвекция, индексы неустойчивости, нелокальная неустойчивость, адвекция влаги, данные численного моделирования, грозовая активность, тригерные механизмы, продолжительность гроз.

Подання до редакції : 02. 03. 2020  
Надходження остаточної версії : 18. 05. 2020  
Публікація статті : 03. 07. 2020

УДК 551.588+ 551.581.1  
PACS: 92.60.Ry+92.60.hf

## ОСНОВНІ НАПРЯМКИ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЗАЄМОДІЇ КЛІМАТУ І ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

Л. А. Писаренко<sup>1</sup>, С. В. Краковська<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Український гідрометеорологічний інститут ДСНС  
України та НАН України, пр. Науки, 37, 03028, Київ, Україна,  
<sup>2</sup>Державна установа Національний антарктичний науковий центр МОН України,  
бул. Тараса Шевченка, 16, 01601, Київ, Україна  
[lolinal@ukr.net](mailto:lolinal@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-2885-0213>

Метою дослідження є аналіз та оцінка існуючих методів вивчення взаємозв'язку між кліматом та підстильною поверхнею. Тип підстильної поверхні, у тому числі й землекористування, здійснює вплив на формування клімату через фізичні та хімічні властивості (альbedo, шорсткість, хімічний склад тощо). Клімат у свою чергу впливає на підстильну поверхню через метеорологічні параметри (температуру і вологість повітря, опади, вітер тощо) та спричиняє як циклічні, так і незворотні її зміни. Ці процеси підсилюються антропогенними факторами, які мають значний вплив на процеси взаємодії «підстильна поверхня-клімат» наприклад, через зміну типу землекористування, яка зазвичай призводить до додаткової емісії хімічних сполук. Виділено три основні сучасні напрямки досліджень взаємодії клімату та змін у землекористуванні/ підстильній поверхні, які реалізуються із залученням супутникових спостережень, використанням геоінформаційних систем та чисельного моделювання. Перший напрямок полягає у моніторингу й визначенні циклічних змін і трансформації підстильної поверхні під дією природних та антропогенних чинників за допомогою супутникового моніторингу та наземних метеорологічних спостережень із застосуванням ГІС. Незважаючи на значний технічний прогрес та велику кількість досліджень, що проводилися нещодавно для визначення динаміки змін підстильної поверхні за різні часові інтервали, досі залишаються проблеми з наявністю хмарності й затіненням від орографічних та інших об'єктів. Другий напрямок стосується вивчення впливу змін підстильної поверхні на хімічний склад повітря у граничному шарі атмосфери та регіональні кліматичні умови. Чимало досліджень присвячено впливу різних типів підстильної поверхні, таких як ліси, пасовища, поля, міське середовище тощо, на кліматичні характеристики, а також потоки речовин, наприклад, CO<sub>2</sub>. Одним з складних та актуальних питань залишається вплив лісів помірних широт на клімат. Третій напрямок пов'язаний із моделюванням змін підстильної поверхні й регіональних кліматичних умов. За останнє десятиріччя просторова роздільна здатність моделей значно зросла і, як результат, представлення взаємодії між атмосферою та підстильною поверхнею значно покращилося. Проаналізовано основні проблеми та виклики сучасних досліджень взаємозв'язку клімату та підстильної поверхні, більшість із яких пов'язані із недосконалістю методів супутникового моніторингу та чисельного моделювання. Найперспективнішими визначено онлайн-інтегровані чисельні моделі атмосфери, які включають зворотні зв'язки між метеорологічними параметрами та хімічним складом атмосфери, на який, у тому числі, впливає підстильна поверхня як на глобальному, так і на регіональному рівнях. Однак, розрахунки деяких фізичних процесів в моделях потребують вдосконалення: трансформації радіаційних потоків, мікрофізика хмар, взаємодія хмара-аерозоль-опади і параметризації деяких типів підстильної поверхні та їх взаємодії з граничним шаром атмосфери.

**Ключові слова:** зміна клімату; природокористування; підстильна поверхня; граничний шар атмосфери; кліматична модель; супутниковий моніторинг; антропогенна діяльність

### 1. ВСТУП

Підстильна поверхня нарівні з сонячною радіацією та циркуляцією атмосфери є одним із трьох основних факторів формування клімату

[1]. Стан підстильної поверхні через особливості орографії та типу покриву впливає на радіаційний і тепловий баланси, розподіл опадів, деяких атмосферних явищ, вологості повітря,

швидкості й напрямку вітру безпосередньо в граничному шарі атмосфери (ГША), вертикальні межі якого змінюються залежно від форм рельєфу. Сніговий покрив, ґрунти, рослинність, зміна типу природокористування (наприклад, заміна лісів на посіви сільськогосподарських культур або пасовища) впливають на перерозподіл сонячної радіації та температури у ГША через альbedo, параметр шорсткості та евапотранспірацію, що являє собою сумарну кількість вологи, що випаровується з поверхні ґрунту, водної поверхні та рослин [1-5]. Більш того, зміни рослинного покриву безпосередньо впливають на вміст малих газових складових нижніх шарів атмосфери [6, 7].

Тип покриву змінюється під впливом природних чинників, таких як чергування пір року та тривалості світлового дня, зокрема, у помірних широтах. Ці фактори впливають на стан рослинності й зумовлюють чергування періоду спокою та вегетації.

Вагомим чинником трансформації підстильної поверхні є антропогенна діяльність, що проявляється через особливості природокористування, зміни співвідношення частки земель під різними видами господарської діяльності, а саме: зрошення та осушення земель, насадження та вирубка лісів, перетворення лісових масивів на сільськогосподарські угіддя або житлові масиви, створення водосховищ тощо [7, 8].

Таким чином, зміна підстильної поверхні відбувається в результаті сукупної дії як циклічних природних факторів, так і внаслідок зміни клімату та діяльності людини. Тобто, підстильна поверхня постійно впливає на клімат і, в той же час, постійно трансформується під впливом кліматичних змін та антропогенної діяльності, формуючи при цьому складні взаємозв'язки в екосистемі. Ці взаємозв'язки діють через різноманітні фізичні, хімічні та біологічні процеси [7, 9, 10].

На сучасному етапі розвитку науки проведення досліджень окремих фізичних процесів та механізмів бажано виконувати не лише на основі аналізу спостережень та даних вимірів, а й залучати новітні методи моделювання задля отримання оптимальної кількості інформації щодо фізичних процесів в атмосфері. Сучасні кліматичні й метеорологічні моделі базуються на вирішенні системи рівнянь гідро- та термодинаміки, складаються з багатьох окремих блоків, які готують вхідні дані, параметризують реальні фізичні процеси, представляють у графічному та інших форматах

результати моделювання [11-15].

Усі сучасні метеорологічні та кліматичні моделі, незалежно від мети використання, обов'язково потребують наявності параметрів, що описують підстильну поверхню (рельєф та тип покриву), а також різноманітні взаємозв'язки між змінами підстильної поверхні та метеорологічних характеристик. Найскладніші з моделей також включають блоки, що описують зміни хімічного складу атмосфери внаслідок, наприклад, викидів забруднюючих речовин та летких органічних сполук з природних й антропогенних джерел [12-16]. Тому використання чисельних моделей в останні десятиріччя призвело до актуалізації проведення експериментальних і теоретичних досліджень взаємозв'язків у системі «підстильна поверхня – біосфера – атмосфера» [12-21].

Мета оглядової статті полягає в аналізі сучасних підходів та найбільш актуальних напрямків дослідження взаємного впливу змін підстильної поверхні, хімічного складу атмосфери та кліматичних характеристик.

Сучасні дослідження взаємозв'язку клімату та підстильної поверхні проводяться у трьох основних напрямках:

- загальний моніторинг та дослідження змін підстильної поверхні, зумовлених природними чинниками й антропогенною діяльністю людини;
- дослідження впливу змін підстильної поверхні на вміст хімічних складових атмосфери і на регіональні кліматичні умови;
- моделювання змін підстильної поверхні та регіональних кліматичних умов у їх взаємозв'язку, у тому числі і для розробки оптимальних заходів планування господарської діяльності людини.

## 2. ЗАГАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

Основні зміни підстильної поверхні в останні десятиріччя зумовлені як антропогенною діяльністю людини, в основному через зміни природокористування, так і кліматичними змінами, що також можуть трансформувати тип покриву [7, 17, 18]. Моніторинг таких змін реалізують із залученням наземних і супутникових вимірювань та із застосуванням геоінформаційних систем (ГІС). Це дозволяє практично у режимі реального часу проаналізувати зміни підстильної поверхні у просторі й часі та діагностувати природу цих

трансформацій [8, 19, 20].

Рушійною силою у дослідженнях взаємодії «підстильна поверхня – клімат» стало створення з 90-х років наземної мережі вимірювань FLUXNET. Мережа FLUXNET – комплекс сучасних станцій різних країн світу з розширеною програмою метеорологічних й актинометричних спостережень разом із вимірами різноманітних характеристик рослинності, у тому числі й фотосинтезу, та потоків окремих газів, аерозолів, пилу та інших домішок у системі «атмосфера-підстильна поверхня». Ці дані використовують як вхідну додаткову інформацію для доповнення метеорологічних і кліматичних моделей з метою якісного прогнозу і досліджень, наприклад, якості повітря [22].

Використання даних наземних та супутникових спостережень, а також чисельного моделювання і методів історичної реконструкції (з XVI ст.) , представлених у [18, 19], показали значний вплив змін підстильної поверхні на регіональні кліматичні умови і потоки хімічних сполук у ГША. При цьому найбільші трансформації підстильної поверхні виявлено у результаті змін саме у природокористуванні. Встановлено, що просторова неоднорідність 10-12 км вже є достатньою для формування мезомасштабної циркуляції, зокрема конвективних процесів. Тому урбанізація й постійне зростання розмірів міст суттєво впливають на мікрокліматичні та регіональні кліматичні особливості. Також за останні десятиріччя виявлено значне зменшення площі лісів як у результаті вирубки, так і кліматичних змін [7, 18, 19]. Використання супутників Landsat, Envisat, GLASS та MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra/Aqua, із залученням ГІС-інструментів дозволило оцінити приріст органічної речовини, зміни продуктивності рослин та їхньої біомаси [23].

Розвиток моніторингу та дослідження змін підстильної поверхні дозволив перейти до вивчення його впливу на колообіг води, вуглецю та тепла в атмосфері [23-26]. Зокрема, активно досліджувалися зміни індексу листової поверхні, що відіграє важливу роль у потоках вологи та вуглекислого газу в атмосфері [23-25]. Верифікація різних алгоритмів розрахунків значень індексу листової поверхні за супутниковими даними виявила, що деякі з них більше підходять для лісів, у той час як інші – для трав'яного покриву [23].

Для можливості вивчення та аналізу змін рослинного покриву, його впливу на клімат,

вдосконалення існуючих моделей, а також створення програм щодо розробки стратегій із адаптації та пом'якшення антропогенного впливу на кліматичну систему, зібрана та розроблена база даних за період 2008-2012 рр. з використанням супутникових даних MODIS/Terra (Aqua) з просторовою роздільною здатністю 0,05° з покриттям від 60°S до 80°N та з часовим кроком 1 місяць [27]. База даних MODIS [28] включає наступні параметри: альbedo, денна та нічна температура підстильної поверхні землі, довгохвильове випромінювання земної поверхні, прихований потік тепла, отриманий шляхом об'єднання даних рослинного покриву, альbedo, індекса листової поверхні та частки поглиненої фотосинтетичної активної радіації. Отримана інформація комбінувалася з даними про короткохвильову відбиту радіацію й довгохвильове випромінювання земної поверхні супутника CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) з розмірною сіткою 1° і даними щорічної карти рослинного покриву, який включає дані за 1992-2015 [28]. Аналіз зазначених супутникових даних дозволив виділити 2 класи трансформації підстильної поверхні: 1 клас з 6 найбільш поширеними і 2 клас з 45 специфічними трансформаціями рослинного покриву [27].

У публікаціях [29-36] зроблено огляд можливих інструментів для моніторингу та методів інвентаризації лісу як різновиду підстильної поверхні за допомогою супутників Landsat за рядами даних з 1972 року. Зокрема, авторами в різних країнах визначалися таксаційні показники лісів: вік, висота, зімкнутість крон, визначення дефоліації; оцінку біомаси лісових насаджень та їх пошкодження; зміну підстильної поверхні на прикладі заростання лісом сільськогосподарських земель. Для верифікації встановлювався зв'язок між таксаційними показниками, що отримані з ділянки під сосною, та можливості їх дешифрування за допомогою знімків Landsat певних спектральних каналів, нормалізованого вегетаційного індексу (NDVI) та індексу вологості Wetness [29, 30, 35]. Індекс NDVI також використовується для оцінки біомаси лісу та ідентифікації ділянок придатних для відновлення лісу, а також його пошкоджень від різних чинників. Проведено картування лісових екосистем за допомогою верифікації супутникових зображень Landsat з певних спектральних каналів та наземних польових ділянок [29, 35, 36]. Ці супутникові дані

використовують як вхідну інформацію для багатьох моделей як кліматичних, так і моделей землекористування.

Проводилась оцінка зміни площ під посівами, лісами та містами для території Європейського союзу за допомогою карт, створених в рамках програми The coordinated information on the European environment (CORINE) та MODIS за період 1990-2006 рр. Встановлено, що загальна площа під посівами зменшилася в основному у Східній Європі внаслідок розширення території пасовищ. У той самий час, площа лісів зросла особливо у Західній та Південній Європі. Але найбільше в Європі зросла площа міст – на 16820 км<sup>2</sup> (21%) [37].

В Україні проводилася кількісна оцінка ймовірності виникнення посухи за допомогою даних супутників NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Створено карти небезпечності посухи та вразливості до неї шляхом оцінки ризиків посушливості за картою площ під сільськогосподарськими культурами та отриманими екстремальними значеннями індекса здоров'я рослинності [38]. Виконано класифікацію сільськогосподарських культур та побудовано карти для вегетаційного періоду за допомогою супутникових знімків на прикладі Київської області в рамках проєкту JECAM (Joint Experiment for Crop Assessment and Monitoring). Для цього використано дані декількох супутників MODIS, Landsat-8, Proba-V, Spot-4,5, Radarsat, Sentinel-1 [39]. За допомогою відкритої бази даних різних супутників Google Earth Engine (GEE) проведено картування сільськогосподарських культур для тієї ж території [40], проте її можна використовувати для різноманітних задач.

За нормалізованим вегетаційним індексом NDVI за даними супутників NOAA бази Global Inventory Monitoring and Modeling System (GIMMS) визначалася динаміка змін підстильної поверхні для України за період 1982-2013 рр. Встановлювався взаємозв'язок індексу з такими змінними величинами як вологість ґрунту і середня місячна температура повітря та сума опадів з бази Climate Research Unit (CRU). Встановлено, що NDVI корелює з вологістю ґрунту в основному на сході України – 12% від загальної площі, з опадами у центральній частині України та на крайньому півдні, з температурою повітря цей зв'язок є найвищим та охоплює 31,5% території України. Найвища кореляція між NDVI і вологістю ґрунту виявлена для пасовищ та луків; найнижча – на ділянках під лісами між NDVI й опадами [41], вочевидь

через те, що опади можуть впливати на лісовий покрив із затримкою у часі.

За допомогою знімків високої роздільної здатності з використанням даних Geo-Wiki створено гібридну карту сільськогосподарських і покинутих земель колишнього СРСР до 2010 року на основі статистичних даних та попередніх досліджень [42].

### 3. ВПЛИВ ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ НА ВМІСТ ХІМІЧНИХ СКЛАДОВИХ АТМОСФЕРИ І НА РЕГІОНАЛЬНІ КЛІМАТИЧНІ УМОВИ

Емісія та вміст парникових газів в атмосфері, таких як діоксид вуглецю CO<sub>2</sub>, метан CH<sub>4</sub>, оксид азоту N<sub>2</sub>O, що спричиняють зростання температури повітря та інші наслідки зміни клімату (перерозподіл опадів [43], хмарності [44], збільшення кількості та інтенсивності небезпечних гідрометеорологічних явищ [4] тощо), є предметом важливої уваги в тому числі і Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК). В Узагальненому П'ятому звіті МГЕЗК поряд з інформацією про сучасні кліматичні зміни, що зумовлені в основному антропогенною діяльністю, та про проєкції цих змін на майбутнє до кінця XXI століття, оцінено їх вплив на навколишнє середовище та запропоновано стратегії щодо запобігання зміні клімату й адаптації до нього міст, прибережних територій, лісів тощо на найближчу і віддалену перспективу [45].

Результати досліджень потоків радіації в атмосфері дали відповідь на питання впливу пожеж у бореальних лісах на альbedo, що є вагомим кліматоутворювальним чинником. Оцінено ефекти впливу лісових пожеж на регіональні кліматичні умови на різних часових масштабах [46, 47]. Для оцінки викидів хімічних сполук в атмосферу створено бази даних із використанням супутників MODIS та біогеохімічної моделі Carnegie–Ames–Stanford Approach (CASA). Ця база даних містить інформацію з 1997 року про глобальну площу пожеж, емісії сполук вуглецю, що виділялися під час горіння, включаючи його суху частку [48].

У статті [49] за допомогою відповідних моделей та даних спостережень, які враховують не тільки гідрометеорологію, а й біогеохімічні процеси та біогеографію, описано вплив лісів тропічної, помірної і бореальної зон на кліматичні умови, а також зворотні зв'язки. Зокрема зазначається, що взаємозв'язки між лісами помірної зони та кліматом ще недостатньо відомі. Хоча вже у сучаснішій

статті [50] зазначено, що ліси помірної зони компенсують антропогенний вплив на клімат через зниження температури повітря у порівнянні з пасовищами й посівами сільськогосподарських культур, проте у деяких роботах зазначено протилежне [51], оскільки трав'яний покрив має вище альbedo. Відомо, що вплив лісів помірної зони на кліматичні та метеорологічні умови залежить від таких факторів як доступність води (опадів, рівень залягання ґрунтових вод) і, відповідно, ступеня зволоженості ґрунту. З одного боку, за достатньої кількості вологи у ґрунті у теплий період року відбувається охолодження території через евапотранспірацію та потоки прихованого тепла, а з іншого – ліси помірної зони мають темне забарвлення, тому для них характерне нижче альbedo і вище поглинання радіації, що сприяє нагріванню навколишнього середовища [51]. Хвойні ліси є досить поширеними на території Центральної та Східної Європи у помірній зоні і вміщують в собі велику кількість вуглецю, проте є дуже чутливими до шкідників. Тому в [50] зауважено, що майбутні зміни клімату можуть сприяти вивільненню  $\text{CO}_2$  у хвойних лісах.

Тропічні ліси через низьке альbedo повинні спричиняти зростання приземної температури повітря, проте за рахунок високої евапотранспірації вони нівелюють ефект потепління на відміну від, наприклад, пасовищ. У посушливі роки з явищем Ель-Ніньйо спостерігається інтенсивніше вивільнення  $\text{CO}_2$  тропічними лісами в атмосферу. Бореальні ліси також підвищують зростання приземної температури повітря через їх низьке альbedo, зокрема, взимку у порівнянні з безлісими площами. У той же час, екосистеми бореальних лісів роблять значний вклад у накопичення та вивільнення  $\text{CO}_2$ . Зміни клімату через підвищення температури призводять до зміщення межі лісу в напрямку полюсу, що зумовлює скорочення хвойних лісів [49].

Кількісна оцінка впливу змін підстильної поверхні на потоки вуглецю в атмосферу для бореальних лісів Середнього Сибіру показала, що ґрунти в лісових екосистемах відіграють значну роль, так як можуть відповідати за 40–80% від загальної емісії [52]. Вимірювання сезонних та добових потоків  $\text{CO}_2$  під час вегетаційного періоду над різними типами підстильної поверхні дозволили встановити незначні зміни над ділянками без надґрунтового покриву, а найбільші флуктуації спостерігалися для ділянки з потужним надґрунтовым покривом

під мішаним лісом. Виявлено, що зростання потоків  $\text{CO}_2$  відбувалося на початку вегетаційного періоду через зростання температури підстильної поверхні. Натомість її підвищення в середині періоду та зниження вологості ґрунту, навпаки, призводило до зниження цих потоків. Отримані результати надзвичайно важливі для моделювання та врахування факту про переважання вивільнення  $\text{CO}_2$  внаслідок «дихання» підстильної поверхні над поглинанням лісами. Це може спричинити перетворення екосистеми з стоку у джерело емісії  $\text{CO}_2$ , особливо при заміщенні хвойних лісів листяними або мішаними через зміну надґрунтового покриву, оскільки для останніх необхідна менша кількість  $\text{CO}_2$  для процесів фотосинтезу [52].

В Україні проводилися подібні експерименти з вимірювання поглинання  $\text{CO}_2$  на півдні у найбільшому штучно створеному лісі Європи з використанням газометричного методу для двох порід хвойних дерев – сосни звичайної і сосни кримської. Встановлено, що остання поглинає більшу кількість  $\text{CO}_2$ . Інтенсивність фотосинтезу починає зростати у травні для обох порід, а максимум фотосинтезу припадає на липень [53]. Досліджувалися потоки  $\text{CO}_2$  на прикладі модельних степових екосистем із штучною зміною кількості опадів за вегетаційний період. Виявлено нелінійні залежності між опадами та диханням ґрунту, яке має значний внесок у емісію  $\text{CO}_2$ . Встановлено, що найвища інтенсивність потоків  $\text{CO}_2$  зафіксована у квітні, а найнижча – у жовтні. Знайдено позитивні залежності між потоками  $\text{CO}_2$  та опадами: при штучному збільшенні опадів на 60% спостерігається зростання емісії, а при зменшенні на 40% – відповідно зниження [54]. Проводилося вимірювання потоків  $\text{CO}_2$  та  $\text{CH}_4$  за допомогою супутників для території України загалом і для кожної адміністративної області та виявлена загальна тенденція до зростання концентрації  $\text{CO}_2$  [55].

Відомо, що розширення території міст (урбанізація), зокрема у Європі [37], зумовлює перетворення великої кількості природних ландшафтів на штучні з такими видами покриттів як асфальт, бетон та інші, що змінює їх фізичні властивості. Вищевказані поверхні є водонепроникними, поглинають від 60 до 95% сонячної радіації та довго утримують тепло [56, 57], сприяючи зростанню температури повітря і, відповідно, формуванню міського острова тепла. Забудова у місті також впливає на утворення місцевої циркуляції повітря, перерозподіл опадів

та вітру тощо. Промислові об'єкти й автотранспорт у містах забруднюють та змінюють хімічний склад атмосферного повітря у ГША тощо [58]. Встановлено, що у міському повітрі кількість аерозолів є на 15-20% вищою, ніж над сільською територією. Вони зменшують надходження сонячної радіації і виступають ядрами конденсації та сприяють утворенню локальних хмар [59]. Показано, що особливості сезонного та річного ходу забруднюючих речовин у ГША, а також зсуви періодів з максимальними значеннями, залежать від змін умов природокористування та рівня антропогенного навантаження на конкретній території для деяких великих міст [60, 61].

#### 4. МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ТА РЕГІОНАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ

Моделювання, наразі, є одним із основних засобів для вивчення та аналізу різних процесів, що протікають в атмосфері, гідросфері, біосфері тощо, відтворення даних процесів, створення певних штучних умов, та є чи не єдиним з інструментів для прогнозування погоди та клімату. Розвиток комп'ютерних потужностей зумовив активізацію досліджень і чисельного моделювання впливу змін підстильної поверхні на вміст хімічних складових атмосфери й на регіональні кліматичні умови. Зокрема, більшість глобальних кліматичних моделей, застосованих для побудови кліматичних проєкцій і оцінок МГЕЗК, розраховувалися з використанням різних сценаріїв емісії парникових газів із врахуванням впливу підстильної поверхні [7, 17, 18, 45].

Для території України за даними глобальних та регіональних кліматичних моделей з використанням трьох SRES-сценаріїв (Special Report on Emissions Scenarios) створені кліматичні проєкції для найближчого майбутнього, на середину і на віддалену перспективу до кінця XXI сторіччя для таких основних показників як приземна середня річна, місячна температура повітря, кількість опадів та середні місячні, сезонні й річні поля хмарності [62, 63], а також для спеціалізованих, таких як дат переходу температури повітря через 0, 5, 10, 15°C навесні й восени та тривалості відповідних періодів [64].

В університеті Гельсінкі розроблено модель динаміки аерозольних часток різних розмірів UHMA (University of Helsinki Multicomponent Aerosol model) для моделювання їх утворення,

росту та розповсюдження в тропосфері за ясного неба. Модель враховує емісію аерозолів різної природи, тобто дозволяє оцінити можливі зміни надходження аерозолів після змін характеристик підстильної поверхні. UHMA дозволяє працювати з такими частками як оксид вуглецю, аміак, мінеральний пил, сульфатна кислота, водорозчинні органічні сполуки, нерозчинні у воді органічні сполуки та включає такі процеси як формування й ріст нових часток, конденсацію, коагуляцію та сухе осадження. Дана модель є базовою для інших моделей у відтворенні динаміки аерозолів, проте, у моделі відсутній механізм вологого осадження, який потрібен для розгляду ситуацій із туманами [6].

Одним із найбільш перспективних інструментів для проведення досліджень взаємозв'язку змін підстильної поверхні та клімату є онлайн-інтегрована модель Enviro-HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) [9]. Застосування метеорологічних та хімічних блоків дозволяє отримати велику кількість характеристик. Можливість зміни типу підстильної поверхні в моделі (гіпотетична вирубка лісу, зміна меж забудови, тощо) й розрахунки для минулих років дозволяють проаналізувати окремі випадки, наприклад, природних і техногенних пожеж та порівняти результати із реальною ситуацією.

Надзвичайно актуальним, але і доволі складним, є моделювання впливу змін підстильної поверхні для розробки оптимальних заходів планування господарської діяльності людини. Один із найбільш вдалих прикладів таких досліджень виконано у рамках Національного плану лісонасадження у Данії [11]. На основі моделювання гіпотетичних варіантів зміни підстильної поверхні та різних варіантів урбанізації за допомогою моделі Enviro-HIRLAM досліджено можливу зміну кліматичних характеристик території. Застосування різних сценаріїв лісонасадження дозволило отримати можливе зниження температури до 3,25°C у міському середовищі на прикладі метеорологічних умов липня 2009 року. Проведене моделювання показало, що добре продуманий план лісонасадження території дозволяє суттєво вплинути на температурне поле і повторюваність екстремальних температур у регіоні. Показано, що оптимальний розподіл рослинності у містах та регіоні дозволяє суттєво модифікувати кліматичні умови території [11]. Enviro-HIRLAM може доповнити регіональну модель HARMONIE з параметризованою конвективною

хмарністю, яка дозволяє вирішувати різноманітні задачі як для оперативного прогнозування погоди, так і для інших наукових цілей, зокрема, для вивчення відгуків підстильна поверхня-атмосфера [65-66].

Автори [67] оцінили стан забруднення атмосфери аерозолем над м. Києвом від лісових пожеж у Росії в 2010 р. Для цього використано дані MODIS супутника TERRA/AQUA й супутника A-Train для ідентифікації площі під пожежами. Використано вхідну метеорологічну інформацію для моделі HYSPLIT-4 (The Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model), що дозволяла відтворити зворотню траєкторію повітряних мас та сонячний фотометр мережі AERONET з метою вимірювання оптичної товщі аерозолу. Згодом автори розширили територію для дослідження й аналізували накопичення забруднюючих домішок над Європейською територією Росії, Східною Європою, зокрема, Україною [68].

Модель екосистем PnET-CN використовували для лісів помірної зони в районі Великих озер з урахуванням кліматичних проєкцій для визначення впливу зміни клімату та довгоперіодичних змін потоків CO<sub>2</sub> на їх продуктивність. Встановлено, що вона вдвічі зростає при підвищенні концентрацій CO<sub>2</sub> і без зміни типу лісу та змінюється у просторі в залежності від типу лісу. За висновками авторів [69] продуктивністю лісів менше залежала від температури та опадів, ніж концентрацій CO<sub>2</sub>. На противагу, у сучаснішому дослідженні оцінки продуктивності лісів помірної зони Центральної Європи з використанням кліматичних проєкцій також виявлено, що вона змінюється в залежності від місцевих умов, проте є залежність від температури й опадів [70]. Схожа робота виконана з застосуванням моделювання ORCHIDEE-GM v2.2 з використанням кліматичних проєкцій для пасовищ та сільськогосподарських угідь для Європейської території. Встановлено, що продуктивність посівів також зростає при підвищенні концентрації CO<sub>2</sub>. За рахунок зростання температури повітря вегетаційний період подовжується, проте зменшення запасів продуктивної вологи в ґрунті призводитиме до посушливості і негативно впливатиме на рослини. Тобто, спостерігатиметься зниження асиміляції CO<sub>2</sub> [71].

Дослідження взаємодії між підстильною поверхнею, лісами та кліматом проведено із застосуванням регіональних кліматичних моделей для бореальної зони [9]. Зокрема,

досліджувався взаємозв'язок підстильна поверхня (зона боліт)-ліси- клімат бореальної зони для регіону Фенноскандії для різних часових проміжків, у тому числі, випадок сильної посухи 2006 року. Використовувалися дані E-Obs, регіональної кліматичної моделі REMO та моделі підстильної поверхні JSBACH, що є частиною моделі MPI-ESM (Max - Planck - Institute Earth System Model). Результатом даної роботи стало впровадження деталізованої карти підстильної поверхні з JSBACH, що дало можливість з вищою точністю моделювати метеорологічні процеси в REMO. Досліджено вплив насадження лісів на болотистій місцевості на регіональний клімат на основі двох карт підстильної поверхні – до осушення (1920-ті роки) і після осушення (2000-ні роки). Автори використовували різні індекси посушливості для перевірки їх здатності ідентифікувати посушливі умови та оцінити ступінь ураженості лісів в даному регіоні на прикладі літа 2006 року, що в подальшому дозволить оцінювати ризики посушливості. Також досліджено відгуки рослинності на посуху через показники валової первинної продуктивності та евапотранспірації. Аналіз результатів виявив, що індекс вологості ґрунтів найкраще ідентифікував посуху. Таким чином, встановлено, що комбінація моделей JSBACH і REMO дозволяє оцінити можливі ризики посухи для лісів на майбутнє [9].

Потоки летких біогенних органічних сполук, вуглецю та вторинних аерозолів органічного походження досліджено у атмосфері Східного Сибіру, де спостерігається відносно швидке потепління клімату. Для вивчення взаємозв'язків «вегетація – зміни клімату – атмосферний CO<sub>2</sub>» використано динамічну глобальну модель вегетації LPJ-GUESS (Lund-Potsdam-Jena General Ecosystem Simulator), а за допомогою глобальної моделі «аерозоль – клімат» ECHAM-HAM створено кліматичну проєкцію до кінця XXI сторіччя за найвищим емісійним сценарієм MГЕЗК RCP8.5 (Representative concentration pathway), за якою виявили зростання індексу площі листової поверхні у зв'язку з вищими концентраціями CO<sub>2</sub> і, відповідно, зростання частки летких біогенних органічних сполук [72].

За даними глобальних та регіональних кліматичних моделей розраховувалися кліматичні проєкції для оцінки вразливості лісів на території України за найбільш вживаним «збалансованим» емісійним сценарієм MГЕЗК A1B і його модифікацією A1B+T-P, який передбачає більш тепліший та сухіший клімат.

Також аналізувалися зміни клімату з використанням лісокліматичної моделі Воробйова й моделі амплітуд толерантності флори Дідуха. Отримані як основні, так і спеціалізовані кліматичні характеристики для лісів: континентальність клімату, дати переходу середньодобової температури повітря через порогові значення 0°, 5°, 10°, 15°C і тривалість періодів між ними, показники омброрежиму й гідротермічні коефіцієнти [73]. За допомогою регіональної кліматичної моделі REMO було оцінено ступінь пожежної небезпеки в лісах та повторюваності небезпечних явищ погоди за сценарієм A1B для південних регіонів України. Тобто, отримані оцінки майбутніх змін кліматичних умов дають можливість перейти до досліджень майбутніх змін типів покриву підстильної поверхні на території України [47].

## 5. ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Незважаючи на активний розвиток досліджень взаємозв'язків підстильної поверхні та клімату, наразі недостатньо вивченими залишається ще низка питань у всіх трьох розглянутих напрямках. Для моніторингу підстильної поверхні з застосуванням супутникових технологій все ще залишається проблемою наявність хмарності [39], тінь від хмар та рельєфу і кількісна оцінка неоднорідності поверхонь, (наприклад, міст) незважаючи на те, що вже є інструменти для проведення атмосферної корекції.

Для вивчення впливу підстильної поверхні на вміст хімічних складових атмосфери і регіональні кліматичні умови подальшого вивчення потребують наступні питання. По-перше, зміни підстильної поверхні впливають на біогеохімічні потоки органічних та неорганічних речовин, що в більшості регіонів досі не описано кількісно [19, 74]. По-друге, детально не вивчено проблему внеску змін у природокористуванні на глобальний клімат, і чи має ефект трансформація підстильної поверхні на віддалені від неї регіони, де підстильна поверхня не зазнала змін. Взаємозв'язки між лісами помірної зони та регіональним кліматом також недостатньо вивчені, оскільки вони є перехідними відносно бореальних та тропічних лісів за їх впливом, наприклад, на вуглецевий цикл і температурний режим через альбедо й евапотранспірацію [49, 51].

За останню декаду відбулося суттєве збільшення горизонтальної роздільної здатності у регіональних кліматичних моделях із 25 до 5-

10 км, що дозволило вирішувати нові задачі, наприклад, встановлення зворотних зв'язків між вологістю ґрунту та опадами. Наразі вдосконалюються параметризації, що дозволяють оцінити ефекти впливу міста на розподіл, зокрема, екстремальних температур. Проте, незважаючи на високу роздільну здатність, багато процесів потребують вдосконалення: мікрофізика хмар й опадів, дрібна конвекція, трансформація потоків сонячної радіації, турбулентність, дифузія [75]. Недостатньо добре вивчено взаємодії між хмарним покривом, аерозолями та опадами, що призводить до їх недосконалого представлення у моделях [17]. Навіть за умови використання достатньо складних моделей впливу підстильної поверхні на ГША, неузгодженості виникають у співвідношенні явних та прихованих потоків тепла [8].

Іншим відкритим питанням залишається включення динаміки вегетації до даних про підстильну поверхню з подальшим врахуванням взаємодії ґрунт/рослинність [67]. Є проблеми у поки що недосконалій параметризації впливу сільськогосподарських угідь, відкритих водойм, систем іригації на локальні та регіональні кліматичні умови через недостатню кількість спостережень за вологістю ґрунту, евапотранспірацією тощо, що у свою чергу впливає на можливість коректної верифікації оновлених схем параметризації. Хоча те, що системи іригації сприяють підвищенню вологості ґрунту, зростанню прихованих і зниженню явних потоків тепла не викликає сумніву [76].

Багато питань викликає вплив урбанізації на потепління на локальному рівні; залежність температури регіонів від інтенсивності вирубки лісів та яке співвідношення рослинності при їх відновленні може зумовити сповільнення поточної швидкої зміни клімату [7, 19, 77].

Очевидно, що вплив підстильної поверхні на загальну та місцеву циркуляцію та на склад атмосфери залежить від території і відіграє суттєву роль під час моделювання, оскільки досі залишаються недостатньо вивченими кількісні оцінки зв'язку підстильної поверхні з атмосферою над різними регіонами.

Таким чином, проведений аналіз та оцінка літературних джерел щодо основних напрямків сучасних досліджень взаємодії клімату і підстильної поверхні показали, що єдиним механізмом вивчення взаємодії клімату й підстильної поверхні на сьогодні є інтеграція біогеохімічних даних дистанційного зондування,

даних наземного моніторингу стану довкілля та комплексного моделювання атмосфери. Розвиток супутникових технологій, збільшення просторової роздільної здатності та покращення якості атмосферної корекції дозволить поступово нівелювати недоліки наявності хмарного покриву та покращить моніторинг фактичних змін підстильної поверхні. Точність визначення змін підстильної поверхні разом із поєднанням супутникових і наземних спостережень за біогеохімічними потоками органічних та неорганічних речовин дозволить ліквідувати недоліки сучасних онлайн-інтегрованих моделей атмосфери, які стають надзвичайно потужним інструментом дослідження численних зв'язків між підстильною поверхнею, хімічним складом атмосфери та кліматом. Інтеграція біогеохімічних даних та онлайн-інтегрованих моделей атмосфери дозволить змодельовати вплив змін у природокористуванні на глобальний та регіональний клімат, отримати ряд параметрів, що описують потоки тепла та речовини за нових (змінених) умов. Подібне поєднання моделей та спостережень дозволить отримувати декілька реалізацій, частина з яких буде відображати реальні умови, інша частина – гіпотетичні (змодельовані) умови. Порівняння характеристик умов розкриватиме аспекти взаємодії змін підстильної поверхні та клімату.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клімат України: монографія / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Ніка-Центр, 2003. 343 с.
2. Міщенко З. А., Ляшенко Г. В. Мікрокліматологія: навч. пос. Одеса, 2005. 336 с.
3. Динаміка температури повітря в Україні за період інструментальних метеорологічних спостережень / Осадчий В. І., Бабіченко В. М., Набиванець Ю. Б. та ін. Київ : Ніка-Центр, 2013. 308 с.
4. Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 pp.) / за ред. В. М. Ліпінського, В. І. Осадчого, В. М. Бабіченко. Київ : Ніка-Центр, 2006. 312 с.
5. Barry R., Hall-McKim E. A. Essentials of the Earth's Climate System. Cambridge University Press, 2014. 274 p.
6. Korhonen H., Lehtinen K. E. J., Kulmala M. Multicomponent aerosol dynamics model UHMA: model development and validation. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2004. 4. Pp. 757–771. <https://doi.org/10.5194/acp-4-757-2004>
7. IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems. URL: [www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/Fullreport-1.pdf](http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/Fullreport-1.pdf) (Accessed: 29.10.2019).
8. Foteck Fonji S., N. Taff G. Using satellite data to monitor land-use land-cover change in North-eastern Latvia. SpringerPlus. 2014. 61 (3). <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-61>
9. Gao Y. Interactions between land surface, forests and climate: regional modelling studies in the boreal zone: PhD thesis / University of Helsinki. Department of Physics. 2016. URL: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/166502> (Accessed: 27.08.2019)
10. de Noblet-Ducoudr'e et al. Determining robust impacts of land-use induced land-cover changes on surface climate over North America and Eurasia: Results from the first set of LUCID experiments. *Journal of Climate*. 2011. 25. Pp. 3261–3281. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00338.1>
11. Stysiak A. A., Jensen M. B., Mahura A. Impact of regional afforestation on climatic conditions in Copenhagen Metropolitan Area: Scientific report. 2015. URL: [https://www.dmi.dk/fileadmin/user\\_upload/Rapporter/SR/2015/sr15-07.pdf](https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/SR/2015/sr15-07.pdf) (Accessed: 10.09.2019)
12. Stocker T. Introduction to Climate Modelling. Springer, 2011. 182 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00773-6>
13. Ojima D. Modelling the Earth System. UCAR / Office for Interdisciplinary Earth Studies, 1992. 495 p.
14. Прусов В. А., Дорошенко А. Ю. Моделювання природних і техногенних процесів в атмосфері. Київ : Наукова думка, 2006. 541 с.
15. Степаненко С. М. Динаміка та моделювання клімату : підручник. Одеса : Екологія, 2013. 203 с.
16. Дымников В. П., Лысков В. Н., Володин Е. М. Моделирование климата и его изменений. *Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т.2. Математическое моделирование* / под. ред. В. П. Дымникова. Москва : Наука, 2005. С. 38–175
17. Global warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. URL: [https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15\\_spm\\_final.pdf](https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf) (Accessed: 01.09.2019)
18. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. URL: [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf) (Accessed: 01.09.2019)
19. Pielke R. et al. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Clim Change*. 2011. 2. Pp. 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
20. Pitman A. J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*. 2003. 23. Pp. 479–510. <https://doi.org/10.1002/joc.893>
21. Baklanov A. et al. Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2). *Geoscientific Model Development*. 2017. 10. Pp. 2971–2999. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>
22. About the FLUXNET Network. URL: <https://fluxnet.fluxdata.org/about/> (Accessed: 10.09.2019)
23. Liu Y. et al. Satellite-derived LAI products exhibit large discrepancies and can lead to substantial uncertainty in simulated carbon and water fluxes. *Remote Sensing of Environment*. 2018. 206. Pp. 174–188.
24. Fangjie M. et al. Coupled LAI assimilation and BEPS model for analyzing the spatiotemporal pattern and heterogeneity of carbon fluxes of the bamboo forest in Zhejiang Province, China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017. 242. Pp. 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.022>
25. Reichenau T. G. et al. Spatial Heterogeneity of Leaf Area Index (LAI) and Its Temporal Course on Arable Land:

- Combining Field Measurements, Remote Sensing and Simulation in a Comprehensive Data Analysis Approach (CDAA). *Plos One*. 2016. 11(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158451>
26. Liu, J. et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote sensing environment*. 1997. 62 (2). Pp. 158-175. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00089-8)
  27. Duveiller G., Hooker J., Cescatti A. Data Descriptor: A dataset mapping the potential biophysical effects of vegetation cover change. *Scientific Data*. 2018. 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.14>
  28. The Land Cover CCI Climate Research Data Package. URL: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php#usertool> (Accessed: 19.09.2019)
  29. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В. и др. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2014. Вып. 1(21). С. 18-32.
  30. Sivanpillai R. et al. Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data. *Forest Ecology and Management*. 2006. 223. Pp. 247–254.
  31. Cohen W. B., Spies T. A. Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and Spot imagery. *Remote Sensing of Environment*. 1992. 41(1). Pp. 1–17.
  32. Heikkilä J., Nevalainen S., Tokola T. Estimating defoliation in boreal coniferous forests by combining Landsat TM, aerial photographs and field data. *Forest ecology and Management*. 2002. 158. Pp. 9–23.
  33. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat / Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Незамаев С. А. и др. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование*. 2013. Вып. 3(19). С. 72-82.
  34. Елсаков В. В. Спутниковая съемка в оценке продуктивности экосистем Европейского Севера. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Вып. 1. С. 87-94.
  35. Bhagat V. S. Use of Landsat ETM+ data for detection of potential areas for afforestation. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. 30(10). Pp. 2607 – 2617.
  36. Levin N. et al. Mapping forest patches and scattered trees from SPOT images and testing their ecological importance for woodland birds in a fragmented agricultural landscape. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. 30(12). Pp. 3147–3169.
  37. Kuemmerle T. et al. Hotspots of land use change in Europe. *Environmental Research Letters*. 2016. 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/6/064020>
  38. Skakun S., Kussul N., Kussul O. et al. Quantitative estimation of drought risk in Ukraine using satellite data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International*. 2014. Pp. 5091-5094. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947642>
  39. Kussul N., Lavreniuk M., Shelestov A. et al. Along the season crop classification in Ukraine based on time series of optical and SAR images using ensemble of neural network classifiers. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Beijing, China. 2016. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730864>.
  40. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N. et al. Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*. 2017. 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00017>
  41. Ghazaryan G., Dubovyk O., Kussul N. et al. Towards an Improved Environmental Understanding of Land Surface Dynamics in Ukraine Based on Multi-Source Remote Sensing Time-Series Datasets from 1982 to 2013. *Remote Sensing*. 2016. 8. <https://doi.org/10.3390/rs8080617>
  42. Lesiv M., Shchepaschenko D., Moltchanova E. et al. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries. *Scientific Data*. 2018. 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>
  43. Мартазинова В. Ф., Щеглов А. А. Характер экстремальных осадков начала XXI столетия на территории Украины. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 36-45. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04>
  44. Заболоцька Т. М., Шпиг В. М. Кількісні зміни хмарності як індикатор періоду глобального потепління. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2015. Вип. 267. С. 23-27
  45. Climate change 2014. Synthesis report. URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf) (Accessed: 19.06.2019)
  46. Randerson J. T. et al. The Impact of Boreal Forest Fire on Climate Warming. *Science*. 2006. 17. P. 1130-1132.
  47. Балабух В. О., Зібцев С. В. Вплив зміни клімату на кількість та площу лісових пожеж у північно-чорноморському регіоні України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. № 18. С. 60-71. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07>
  48. Global Fire Emissions Database. URL: <https://www.globalfiredata.org/data.html> (Accessed: 19.09.2019)
  49. Gordon B., Bonan. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*. 2008. 320. Pp. 1444-1449.
  50. Thom D., Rammer W., Seidl R. The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes. *Ecological Monographs*. 2017. 87(4). Pp. 665–684. <https://doi.org/10.1002/ecm.1272>.
  51. Sanderson M. et al. Relationships between forests and weather. *EC Directorate General of the Environment 13th January 2012*. 2012. URL: [http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/EU\\_Forests\\_annex1.pdf](http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/EU_Forests_annex1.pdf) (Accessed: 25.09.2019)
  52. Динамика потоков CO<sub>2</sub> с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири / Махныкина А. В., Прокушкин А. С., Ваганова Е. А. и др. *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2016. №3(9). С. 338-357.
  53. Ляшенко Г. В., Кузнецова Ю. О. Вплив стану лісового господарства півдня України на регулювання вуглекислого газу в атмосфері. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. №18. С. 105-111. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.12>
  54. Халаїм О. О. Оцінка потоків CO<sub>2</sub> у модельних степових екосистемах за різної кількості опадів: автореф. дис.. к-та біол. наук / НАУКМА. Київ, 2017. 22 с.
  55. Лялько В. І. Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки. Київ: Наукова думка, 2015. 283 с.
  56. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Urban Heat Island Basics. URL: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/basicscompendium.pdf> (Accessed: 25.09.2019)
  57. Шевченко О. Г. Прояв зміни клімату на території м. Києва та основні підходи до його адаптації. *Часопис картографії*. 2017. Вип. 1. С. 108-122.
  58. Mahmood R. Impacts of Land Use/Land Cover Change on

- Climate and Future Research Priorities. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2010. 91. Pp. 37-46.
59. Сніжко С. І., Шевченко О. Г. Урбометеорологічні аспекти забруднення атмосферного повітря великого міста. Київ : Обрії. 2011. 297 с.
  60. Savenets M., Nadtochii L., Dvoretzka I. NO<sub>2</sub> seasonal and interannual variability in Ukrainian industrial cities. *GeoScience Engineering*. 2018. LXIV(4). Pp. 29–36.
  61. Особливості динаміки забруднення атмосферного повітря пилом у деяких містах України / Надточій Л. М., Савенець М. В., Баштаннік М. П. та ін. *Український географічний журнал*. 2019. №1(105). С. 43–50.
  62. Паламарчук Л. В., Краковська С. В. Регіональні зміни клімату України: Методичні вказівки до навчального курсу для студентів географічного факультету спеціальності «Метеорологія та кліматологія». Київ : Прінт-Сервіс, 2018. 90 с.
  63. 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>
  64. Польовий А. М., Божко Л. Ю. Теплові ресурси України в умовах зміни клімату. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. №16. С. 99-106. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.13>
  65. Паламарчук Ю. О., Іванов С. В., Рубан І. Г. Технология численного описания состояния атмосферы на основе моделирующей системы HARMONIE. 2017. *Тези доповідей I Всеукр. гідрометеорологічного з'їзду з міжнародною участю, 22-23 березня. Одеса*. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/1924/> (дата звернення: 21.09.2019)
  66. Groisman P. Ya., Ivanov S. V. Regional aspects of climate-terrestrial-hydrologic interactions in non-boreal Eastern Europe. Springer, 2009. 376 p.
  67. Галицька С. І., Данилевський В. О., Сніжко С. І. Стан забруднення аерозолем атмосфери над Києвом за дистанційними дослідженнями засобами AERONET та вплив на нього лісових пожеж улітку 2010 р. *Геополітика и экогеодинамика регионов*. 2014. Т.10. С. 437-444.
  68. Galytska E., Danylevsky V., Hommel R. et al. Increased aerosol content in the atmosphere over Ukraine during summer 2010. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2018. 11. Pp. 2101-2118. <https://doi.org/10.5194/amt-11-2101-2018>
  69. Peters E. B. et al. Potential climate change impacts on temperate forest ecosystem processes. *Canadian Journal of Forest Research*. 2013. 43. P. 939-950.
  70. Morin X. et al Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*. 2018. 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>
  71. Chang J. et al. Future productivity and phenology changes in European grasslands for different warming levels: implications for grassland management and carbon balance. *Carbon Balance Management*. 2017. 12. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0079-8>
  72. Arneeth A. et al. Future vegetation–climate interactions in Eastern Siberia: an assessment of the competing effects of CO<sub>2</sub> and secondary organic aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. 16. Pp.5243-5262
  73. Швиденко А. З., Букша І. Ф., Краковська С. В. Уразливість лісів України до зміни клімату: монографія. Київ, Ніка-Центр, 2018. 184 с.
  74. Findell K. L. et al. Regional and global impacts of land cover change and sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*. 2009. 22. Pp. 3248–3269. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2580.1>.
  75. Rummukainen M. et al. Twenty-first-century challenges in regional climate modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. 96(8). Pp. 135-137. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00214.1>
  76. Lawston P. M. et al. Assessment of Irrigation Physics in a Land Surface Modeling Framework using Non-Traditional and Human-Practice Datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. 21(6). Pp. 2953–2966. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2953-2017>
  77. Mahmood R. et al. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*. 2014. 34. Pp. 929-953.

## REFERENCES

1. Lipinsky, V.M., Diachuk, V.A. & Babichenko, V.M. (eds). (2003). *Klimat Ukrainy [Climate of Ukraine]*. Kyiv: Nika-Tsentr. (in Ukr.)
2. Mishchenko, Z.A. & Liashenko, G.V. (2005). *Mikroklimatolohiia. [Microclimatology]*. Odesa (In Ukr.)
3. Osadchii, V.I., Babichenko, V.M., Nabyvanets Y.B. et al. (2013). *Dynamika temperatury povitria v Ukraini za period instrumentalnykh meteorolohichnykh sposterezhen [Dynamics of Air Temperature in Ukraine over Instrumental Observation Period]*. Kyiv: Nika-Tsentr. (in Ukr.)
4. Lipinsky, V.M., Osadchii V. & Babichenko, V.M. (eds.) (2006). *Stykhiini meteorolohichni yavyschcha na terytorii Ukrainy za ostannie dvadtsiatyrichchia (1986-2005). [Natural meteorological weather phenomena in Ukraine for the last twenty years (1986-2005)]*. Kyiv. (in Ukr.)
5. Barry, R. & Hall-McKim, E.A. (2014). *Essentials of the Earth's Climate System*. Cambridge University Press.
6. Korhonen, H., Lehtinen, K.E.J. & Kulmala, M. (2004). Multicomponent aerosol dynamics model UHMA: model development and validation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, pp. 757–771. <https://doi.org/10.5194/acp-4-757-2004>
7. *IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Available at: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/Fullreport-1.pdf> (Accessed: 29.10.2019).
8. Foteck Fonji, S. & N. Taff, G. (2014). Using satellite data to monitor land-use land-cover change in North-eastern Latvia. *SpringerPlus*, 61 (3). <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-61>.
9. Gao, Y. (2016). *Interactions between land surface, forests and climate: regional modelling studies in the boreal zone*. PhD thesis. University of Helsinki. Department of Physics. Available at: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/166502> (Accessed: 27.08.2019)
10. de Noblet-Ducoudr'e et al. (2011). Determining robust impacts of land-use induced land-cover changes on surface climate over North America and Eurasia: Results from the first set of LUCID experiments. *Journal of Climate*, 25, pp. 3261-3281. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00338.1>
11. Stysiak, A.A., Jensen, M.B. & Mahura, A. (2015). *Impact of regional afforestation on climatic conditions in Copenhagen Metropolitan Area: Scientific report*. Available at: [https://www.dmi.dk/fileadmin/user\\_upload/Rapporter/SR/2015/sr15-07.pdf](https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/SR/2015/sr15-07.pdf) (Accessed: 10.09.2019)

12. Stocker, T. (2011). *Introduction to Climate Modelling*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00773-6>
13. Ojima, D. (1992). *Modelling the Earth System*. UCAR. Office for Interdisciplinary Earth Studies.
14. Prusov, V.A. & Doroshenko, A.Yu. (2006). *Modeliuvannia pryrodnykh i tekhnohennykh protsesiv v atmosferi [Modelling natural and technogenic processes in the atmosphere]*. Kyiv: Naukova Dumka. (In Ukr.)
15. Stepanenko, S.M. (2013). *Dynamika ta modeliuvannia klimatu [Dynamics and climate modeling]*. Odesa: Ekolohiia. (In Ukr.)
16. Dymnikov, V.P., Lykosov V.N., Volodin E.M. et al. (2005). Modelirovanie klimata i ego izmeneniy [Modeling climate and its changes]. In: Dymnikov V.P. (eds). *Sovremennye problemy vychislitel'noy matematiki i matematicheskogo modelirovaniya [Contemporary problems of numerical mathematics and mathematical modelling]*. Vol. 2. *Matematicheskoe modelirovanie. [Mathematical modelling]*. Moscow: Nauka, pp. 38-175
17. Global warming of 1.5°C. *Summary for Policymakers*. Available at: [https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15\\_spm\\_final.pdf](https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf) (Accessed: 01.09.2019)
18. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Available at: [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf) (Accessed: 01.09.2019)
19. Pielke, R., et al. (2011). Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Clim Change*, 2, pp. 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>.
20. Pitman, A.J. (2003). The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*, 23, pp. 479–510. <https://doi.org/10.1002/joc.893>.
21. Baklanov, A. et al. (2017). Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2). *Geoscientific Model Development*, 10, pp. 2971–2999. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>
22. About the FLUXNET Network. Available at: <https://fluxnet.fluxdata.org/about/> (Accessed: 10.09.2019)
23. Liu, Y. et al. (2018). Satellite-derived LAI products exhibit large discrepancies and can lead to substantial uncertainty in simulated carbon and water fluxes. *Remote Sensing of Environment*, 206, pp.174-188
24. Fangjie, M. et al. (2017). Coupled LAI assimilation and BEPS model for analyzing the spatiotemporal pattern and heterogeneity of carbon fluxes of the bamboo forest in Zhejiang Province, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 242, pp. 96-108. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.022>
25. Reichenau, T.G. et al. (2016). Spatial Heterogeneity of Leaf Area Index (LAI) and Its Temporal Course on Arable Land: Combining Field Measurements, Remote Sensing and Simulation in a Comprehensive Data Analysis Approach (CDAA). *Plos One*, 11(7), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158451>
26. Liu, J. et al. (1997). A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote sensing environment*, 62 (2), pp. 158-175. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00089-8)
27. Duveiller, G., Hooker, J. & Cescatti, A. (2018). Data Descriptor: A dataset mapping the potential biophysical effects of vegetation cover change. *Scientific Data*, 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.14>
28. *The Land Cover CCI Climate Research Data Package*. Available at: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php#usertool> (Accessed: 19.09.2019)
29. Kurbanov, E.A., Vorobyev, O.N., Gubayev, A.V. et al. (2014). *Chetyre desiatiletiia issledovani lesov po snimkam landsat [Four decades of forest research with the use of Landsat images]*. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management]*, 1(21), pp.18-32. (In Russ.)
30. Sivanpillai, R. et al. (2006). Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data. *Forest Ecology and Management*, 223, pp. 247–254.
31. Cohen, W.B. & Spies, T.A. (1992). Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and Spot imagery. *Remote Sensing of Environment*, 41(1), pp. 1–17.
32. Heikkilä, J., Nevalainen, S. & Tokola, T. (2002). Estimating defoliation in boreal coniferous forests by combining Landsat TM, aerial photographs and field data. *Forest ecology and Management*, 158, pp. 9–23.
33. Kurbanov, E.A., Vorobyev, O.N., Nezamayev, S.A. et al. (2013). *Tematicheskoe kartirovanie i stratifikatsiia lesov Mariiskoho Zavolzhia po sputnikovym snimkam Landsat. [Thematic mapping and stratification of forests in Middle Zavolsgie by Landsat satellite images]*. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management]*, 3(19), pp. 72-82. (In Russ.)
34. Elsakov, V.V. (2012). *Sputnykovaia siemka v otsenke produktivnosti ekosistem Evropeiskoho Severa [The remote sensing data in European North productivity estimation]*. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 1, pp.87-94. (In Russ.)
35. Bhagat, V.S. (2009). Use of Landsat ETM+ data for detection of potential areas for afforestation. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), pp. 2607–2617.
36. Levin, N. et al (2009). Mapping forest patches and scattered trees from SPOT images and testing their ecological importance for woodland birds in a fragmented agricultural landscape. *International Journal of Remote Sensing*, 30(12), pp. 3147–3169.
37. Kuemmerle, T. et al. (2016). Hotspots of land use change in Europe. *Environmental Research Letters*, 15, doi:10.1088/1748-9326/11/6/064020
38. Skakun S., Kussul N., Kussul O. et al. (2014). Quantitative estimation of drought risk in Ukraine using satellite data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International*. pp. 5091-5094. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947642>
39. Kussul, N., Lavreniuk, M., Shelestov, A. et al. (2016). Along the season crop classification in Ukraine based on time series of optical and SAR images using ensemble of neural network classifiers. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Beijing, China. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730864>.
40. Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N. et al. (2017). Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00017>
41. Ghazaryan, G., Dubovyk, O., Kussul, N. et al. (2016). Towards an Improved Environmental Understanding of

- Land Surface Dynamics in Ukraine Based on Multi-Source Remote Sensing Time-Series Datasets from 1982 to 2013. *Remote Sensing*, 8, <https://doi.org/doi:10.3390/rs8080617>
42. Lesiv, M., Schepaschenko, D., Moltchanova, E., et al. (2018). Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries. *Scientific Data*, 5, <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>
  43. Martazinova, V.F. & Shcheglov, O.A. (2018). [Nature of extreme precipitation over Ukraine in the 21st century]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 22, pp. 36-45. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04> (in Russ.)
  44. Zabolotska, T.M., Shpyg V.M. (2015). [Quantitative changes of cloud cover as indicator of global warming period]. *Naukovi pratsi UkrNDHMI [Scientific Papers of UHMI]*, 267, pp.23-27.
  45. *Climate change 2014. Synthesis report*. Available at: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf) (Accessed: 19.06.2019)
  46. Randerson, J.T. et al. (2006). The Impact of Boreal Forest Fire on Climate Warming. *Science*, 17, pp. 1130-1132.
  47. Balabukh, V.O. & Zibitsev, S.V. (2016). [Impact of climate change on the quantity and area of forest fires in the North part of the Black sea region of Ukraine]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 18, pp. 60-71 (In Ukr.) <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07>
  48. *Global Fire Emissions Database*. Available at: <https://www.globalfiredata.org/data.html> (Accessed: 19.09.2019)
  49. Gordon, B. Bonan. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320, pp. 1444-1449.
  50. Thom, D., Rammer, W. & Seidl, R. (2017). The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes. *Ecological Monographs*, 87(4), pp. 665–684. <https://doi.org/10.1002/ecm.1272>.
  51. Sanderson, M. et al. (2012). Relationships between forests and weather. *EC Directorate General of the Environment 13th January 2012*. Available at: [http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/EU\\_Forests\\_annex1.pdf](http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/EU_Forests_annex1.pdf) (Accessed: 25.09.2019)
  52. Makhnykina, A.V., Prokushkin, A.S., Vaganova, E.A. et al. (2016). [Dynamics of the CO<sub>2</sub> Fluxes from the Soil Surface in Pine Forests in Central Siberia]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya [Journal of Siberian Federal University. Biology]*, 3 (9), pp. 338-357 (In Russ.)
  53. Lyashenko, H.V. & Kuznetsova, Yu.O. (2016). [Influence of forestry in the South of Ukraine on carbon dioxide control in the atmosphere]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 18, pp. 105-111. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.12>
  54. Khalaim, O.O. (2017). *Otsinka potokiv CO<sub>2</sub> u modelnykh stepovykh skosystemakh za riznoi kilkosti opadiv [Estimation of CO<sub>2</sub> fluxes in model steppe ecosystems under altered precipitation]*. Abstract of PhD in Biology. National University "Kyiv-Mohyla Academy" (In Ukr.)
  55. Lyalko, V.I. (2015). *Parnykovyi efekt i zminy klimatu v Ukraini: otsinky ta naslidky. [Greenhouse Effect and Climate Changes in Ukraine: assessments and consequences]*. Kyiv: Naukova Dumka (In Ukr.)
  56. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Urban Heat Island Basics*. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/basicscompendium.pdf> (Accessed: 25.06.2019)
  57. Shevchenko, O. (2017). [Climate change manifestation on the territory of Kyiv and main approaches to its adaptation]. *Chasopys kartohrafi [Magazine of Cartography]*, 1, pp. 108-122. (In Ukr.)
  58. Mahmood, R. (2010). Impacts of Land Use/Land Cover Change on Climate and Future Research Priorities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, pp. 37-46.
  59. Snizhko, S.I. & Shevchenko, O.H. (2011). *Urbometeorologichni aspekty zabrudnennia atmosferneho povitria velykoho mista [Meteorological aspects of air pollution of Urban Areas]*. Kyiv: Obrii. (In Ukr.)
  60. Savenets, M., Nadochii, L. & Dvoretzka, I. (2018). NO<sub>2</sub> seasonal and interannual variability in Ukrainian industrial cities. *GeoScience Engineering*, LXIV (4), pp. 29–36.
  61. Nadochii, L.M., Savenets, M.V., Bashtannik, M.P. et al. (2019). [The features of dust air-pollution dynamics in certain Ukrainian cities]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 1, pp. 43-50 (In Ukr.)
  62. Palamarchuk, L.V. & Krakovska, S.V. (2018). *Rehionalni zminy klimatu Ukrainy: Metodychni vkazivky do navchalnogo kursu dlia studentiv heohrafichnogo fakultetu spetsialnosti «Meteorologhiia Ta Klimatologhiia» [Regional climate change in Ukraine: training manual]*. Kyiv: Print-Servis. (In Ukr.)
  63. Khokhlov, V. & Yermolenko, N. (2015). [Future climate change and it's impact on precipitation and temperature in Ukraine]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 16, pp.76-82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10>
  64. Pol'ovyi, A.M. & Bozhko, L.Yu. (2015). [Thermal resources of Ukraine in the conditions of climate change]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 16, pp.99-106. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.13>
  65. Palamarchuk, Yu.O., Ivanov, S.V. & Ruban, I.G. (2017). Tekhnologiya chislennogo opisaniya sostoyaniya atmosfery na osnove modeliruyushchey sistemy HARMONIE. [Technology of numerical description atmosphere based on modeling system HARMONIE]. *Tezy dopovidei 1th Vseukrainskoho hidrometeorologichnoho zizdu z mizhnarodnoiu uchastiu [Theses of reports of the First All-Ukrainian Hydrometeorological Congress with International Participation]*, 22-23 March. Odesa. Available at: <http://eprints.library.odku.edu.ua/1924/> (In Russ.)
  66. Groisman, P.Ya. & Ivanov, S.V. (2009). *Regional aspects of climate-terrestrial-hydrologic interactions in non-boreal Eastern Europe*. Springer.
  67. Galytska, E., Danylevsky, V. & Snizhko, S. (2014). [State of aerosol pollution of the atmosphere over Kyiv by means of remote studies AERONET and the impact of forest fires in the summer of 2010]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and Ecogeodynamics of regions]*, 10, pp. 437-444. (In Ukr.)
  68. Galytska, E., Danylevsky, V., Hommel, R. et al. (2018). Increased aerosol content in the atmosphere over Ukraine during summer 2010. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, pp. 2101-2118. <https://doi.org/10.5194/amt-11-2101-2018>
  69. Peters, E.B. et al. (2013). Potential climate change impacts on temperate forest ecosystem processes. *Canadian Journal of Forest Research*, 43, pp.939-950.
  70. Morin, X. et al. (2018). Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>
  71. Chang, J. et al. (2017). Future productivity and phenology

- changes in European grasslands for different warming levels: implications for grassland management and carbon balance. *Carbon Balance Management*, 12, <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0079-8>
72. Arneth, A. et al. (2016). Future vegetation–climate interactions in Eastern Siberia: an assessment of the competing effects of CO<sub>2</sub> and secondary organic aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, pp. 5243–5262
  73. Shvidenko, A., Buksha, I. & Krakovska, S. (2018). *Urazlyvist lisiv Ukrainy do zminy klimatu [Vulnerability of Ukraine's forests to climate change]*. Kyiv: Nika-Centre.
  74. Findell, K.L. et al. (2009). Regional and global impacts of land cover change and sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 22, pp. 3248–3269. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2580.1>
  75. Rummukainen, M. et al. (2015). Twenty-first-century challenges in regional climate modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(8), pp. 135–137. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00214.1>
  76. Lawston, P.M. et al. (2017). Assessment of Irrigation Physics in a Land Surface Modeling Framework using Non-Traditional and Human-Practice Datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), pp. 2953–2966. <https://doi.org/doi:10.5194/hess-21-2953-2017>
  77. Mahmood, R. et al. (2014). Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*, 34, pp. 929–953.

## MAIN DIRECTIONS IN MODERN RESEARCH OF INTERACTION BETWEEN CLIMATE AND LAND USE/LAND COVER CHANGES

L. A. Pysarenko<sup>1</sup>, S. V. Krakovska<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ukrainian Hydrometeorological Institute, Ukraine, 03028, Kyiv, Nauky Prospekt., 37,

<sup>2</sup>State Institution National Antarctic Scientific Center, Ukraine, 01601, Kyiv, Taras Shevchenko Boulevard, 16  
lolinal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2885-0213>

The purpose of the research is to analyse and assess existing approaches in investigation of interconnections between climate and underlying surface. Land use/land cover (LULC) influences climate formation via physical and chemical properties (albedo, roughness, height, chemical composition etc.). Climate in its turn affects land cover by means of meteorological parameters (air temperature and humidity, precipitation, wind etc.) and causes both cyclic and irreversible changes in land cover. In addition, anthropogenic factors exacerbate surface-climate interactions through? for example, LULC change that usually causes an additional release of chemical compounds. The paper distinguishes three main directions of the “climate - LULC” interactions research that is conducted mainly with application of satellite monitoring products, observation dataset, geographic information systems (GIS) and numerical modelling. The first direction implies monitoring and research of cyclic changes and transformation of LULC influenced by natural and anthropogenic factors, using different GIS-based satellite and surface meteorological observation databases. Despite significant technical progress and great amount of studies conducted for detecting dynamics of LULC change for different time intervals, the problems of dealing with cloudiness and shadows from orographic and other objects still remain. The second direction investigates the influence of LULC change on the chemical composition in the atmospheric boundary layer and on the regional climate. Numerous researches were dedicated to the influence of different kinds of surface such as forests, grasslands, croplands, urban areas etc. on climate characteristics and also on fluxes, for example, CO<sub>2</sub>. The effect of midlatitude forests on climate remains to be one of the challenging and urgent issues. The third direction relates to LULC change modelling and regional climate modelling. For the last decade a spatial resolution of models was considerably increased and, as a result, representation of interaction between atmosphere and land improved. Online integrated numerical atmospheric models are found as the most promising ones. They include “meteorological parameters – atmospheric chemical composition” feedbacks and can consider LULC on global and regional scales. However, some issues still need improvement, namely radiative transfer, cloud microphysics, cloud-aerosol-precipitation interactions, as well as parametrizations of some types of land and their interaction with the atmospheric boundary layer.

**Keywords:** climate change, natural resource management, land cover, atmospheric boundary layer, climate model, satellite monitoring, anthropogenic activity

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛИМАТА И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Л. А. Писаренко<sup>1</sup>, С. В. Краковская<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС  
Украины и НАН Украины, пр. Науки, 37, 03028, Киев, Украина,

<sup>2</sup> Государственное учреждение Национальный антарктический научный центр МОН Украины,  
бул. Тараса Шевченка, 16, 01601, Киев, Украина  
[lolinal@ukr.net](mailto:lolinal@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-2885-0213>

Целью исследования является анализ и оценка существующих методов изучения взаимосвязи между климатом и подстилающей поверхностью. Землепользование, которое определяет тип подстилающей поверхности, оказывает влияние на формирование климата через физические и химические свойства (альбедо, шероховатость, химический состав и т.д.). Климат в свою очередь влияет на подстилающую поверхность посредством метеорологических параметров (температуру и влажность воздуха, осадки, ветер и т.д.) и приводит как к циклическим, так и необратимым изменениям подстилающей поверхности. Эти процессы усиливаются антропогенными факторами, которые значительно влияют на взаимодействие «подстилающая поверхность – климат» из-за, например, изменения типа землепользования, что в свою очередь приводит к дополнительной эмиссии химических соединений. Выделено три основные современные направления исследований взаимодействия климата и изменений в землепользовании / подстилающей поверхности, реализуемых с привлечением спутниковых наблюдений, использованием геоинформационных систем и численного моделирования. Первое направление заключается в мониторинге и определении циклических изменений и трансформаций подстилающей поверхности под воздействием природных и антропогенных факторов с помощью спутникового мониторинга и наземных метеорологических наблюдений с применением ГИС. Несмотря на значительный технический прогресс и большое количество исследований, которые выполнялись недавно для определения динамики изменений подстилающей поверхности за различные временные интервалы, до сих пор остаются проблемы с наличием облачности и затенением от орографических и других объектов. Второе направление касается изучения влияния изменений подстилающей поверхности на химический состав воздуха в пограничном слое атмосферы и на региональные климатические условия. Большое количество исследований посвящено влиянию различных типов подстилающей поверхности, таких как леса, пастбища, поля, городская среда и т.д., на климатические характеристики, а также потоки веществ, например, CO<sub>2</sub>. Один из сложных и актуальных вопросов остается влияние лесов умеренных широт на климат. Третье направление связано с моделированием изменений подстилающей поверхности и региональных климатических условий. За последнее десятилетие пространственное разрешение моделей значительно возросло и, как результат, представление взаимодействия между атмосферой и подстилающей поверхностью значительно улучшилось. Проанализированы основные проблемы и вызовы современных исследований взаимосвязи климата и подстилающей поверхности, большинство из которых связаны с несовершенством методов спутникового мониторинга и численного моделирования. Наиболее перспективными определены онлайн-интегрированные численные модели атмосферы, которые включают обратные связи между метеорологическими параметрами и химическим составом атмосферы, на который, в том числе, оказывает влияние подстилающая поверхность как на глобальном, так и на региональном уровнях. Однако, расчеты некоторых физических процессов в моделях нуждаются в совершенствовании: трансформации радиационных потоков, микрофизика облаков, взаимодействие облако-аэрозоль-осадки и параметризация некоторых типов подстилающей поверхности и их взаимодействия с пограничным слоем атмосферы.

**Ключевые слова:** изменение климата, природопользование, подстилающая поверхность, пограничный слой атмосферы, климатическая модель, спутниковый мониторинг, антропогенная деятельность

Подання до редакції: 31. 10. 2019

Надходження остаточної версії: 17. 04. 2020

Публікація статті: 03. 07. 2020

УДК: 551.510.534;551.520.17

## СТАН ОЗОНОВОГО ШАРУ ТА РІВНЯ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ОПРОМІНЕННЯ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ У 2019 РОЦІ

М. В. Савенець<sup>1</sup>, І. В. Дворецька<sup>1</sup>,  
А. П. Уманець<sup>1</sup>, Н. В. Гречана<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Український гідрометеорологічний інститут ДСНС  
України та НАН України, пр. Науки, 37, 03028, Київ, Україна,  
[savenetsm@gmail.com](mailto:savenetsm@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

<sup>2</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
вул. Володимирська, 64/13, 01601, Київ, Україна

У статті представлено результати щодобового моніторингу стану озонowego шару та рівня ультрафіолетового опромінення території України у 2019 році. Для моніторингу та аналізу використано дані загального вмісту озону, виміряні супутниковим приладом Ozone Monitoring Instrument (OMI), та розрахункові значення ультрафіолетового індексу. Дослідження проведено на регулярній сітці з просторовою роздільною здатністю 1° та окремо для географічних координат центрів адміністративних областей України. У 2019 р. ЗВО коливався в межах багаторічної норми та в середньому дорівнював 260–370 о.Д. У зимовий сезон концентрації озону були найвищими, що обумовлено інтенсивною циркуляцією Брюера-Добсона. Послаблення полярного вихору та адвекція збагаченого озоном повітря на висотах спричинила появу позитивних аномалій ЗВО над територією України. Проникнення атмосферних мас на територію України відбувалося з північного заходу, що обумовило появу аномально високих значень ЗВО в період 23–24 лютого, 2 березня, 12–14 березня та 26 березня. Під час цих періодів ЗВО збільшувався до 450–500 о.Д. Сезонне зменшення ЗВО, зумовлене послабленням циркуляції Брюера-Добсона та інтенсифікацією фотохімічних реакцій руйнування озону, спостерігалось з квітня по червень. Проте, відхилення ЗВО від норми були незначні, що сприяло відсутності дуже високих значень УФ-індексу, який не досягав 7 одиниць. Липень характеризувався вищими концентраціями озону, що найімовірніше обумовлено динамічними факторами. В результаті цього УФ-індекс коливався в межах 3–4 одиниць, що для території України характерно у квітні–травні. Результатом подібних варіацій ЗВО стала відсутність влітку 2019 р. екстремально високих рівнів ультрафіолетового опромінення. У наступні місяці спостерігалось типове сезонне зменшення ЗВО з мінімальними значеннями у жовтні в результаті формування й інтенсифікації полярного вихору. В середньому найменші значення досягли 260–270 о.Д., проте ці відхилення близькі до норми у жовтні з відносними відхиленнями близько -0.3σ. Сезонне збільшення ЗВО у 2019 р. розпочалося у середині листопада. Вже у кінці грудня почали спостерігатися перші значні позитивні відхилення, які досягли близьких до аномальних значень у 2–2.4σ.

**Ключові слова:** загальний вміст озону, ультрафіолетове опромінення, УФ-індекс, аномалія, відхилення

### 1. ВСТУП

Озоновий шар у природі відіграє дві ключові ролі. По-перше, він є важливою складовою кліматичної системи, формуючи температурний режим стратосфери [1,2]. По-друге, існування наземних екосистем можливе тільки за умови існування озонowego шару, що повністю поглинає згубне для живих організмів сонячне випромінювання в спектрі 100–280 нм («жорсткий» ультрафіолет або УФ-С) [1,3]. Частково поглинається й УФ-В опромінення в спектрі 280–315

нм. Зменшення загального вмісту озону (ЗВО) призводить до збільшення інтенсивності ультрафіолетового опромінення (УФ-опромінення), великі дози якого є небезпечними для здоров'я людини, підвищуючи ризики виникнення таких захворювань як рак шкіри, катаракта, тощо [3].

Враховуючи те, що невеликі дози УФ-опромінення є корисними завдяки утворенню вітаміну D, в той же час великі дози є шкідливими [3], постійний моніторинг та прогноз ЗВО та УФ-опромінення повинен бути невід'ємною

складовою забезпечення діяльності санаторно-курортної галузі, що актуально для помірних та низьких широт. В період з травня до жовтня, коли спостерігається збільшення кількості відпочиваючих, повинні забезпечуватись обов'язкові оповіщення населення про рівні УФ-опромінення. На жаль, в Україні подібна практика не реалізовується, незважаючи на існування регулярного щодобового контролю стану озонowego шару та рівнів УФ-опромінення, що забезпечується лабораторією моніторингу атмосферного повітря Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України. Через відсутність повірених приладів на українській мережі спостережень, щодобовий контроль за станом озонowego шару проводиться за супутниковими даними.

З метою популяризації інформації про стан озонowego шару над територією України та сприяння збільшення кількості наукових досліджень, у минулому році відновлено написання щорічних оглядів у наукових виданнях [4]. Раніше існувала практика публікації подібних оглядів як частина Національних доповідей про стан навколишнього природного середовища [5].

Метою даної роботи є представлення детального аналізу стану озонowego шару та рівня ультрафіолетового опромінення над територією України у 2019 році, дослідження та пояснення причин просторово-часових варіацій ЗВО та небезпечних відхилень УФ-індексу.

## 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Методика досліджень подібна до методики огляду стану озонowego шару та рівня УФ-опромінення за 2018 рік [4]. Щодобовий моніторинг ЗВО та аналіз стану озонowego шару над територією України у 2019 році здійснено з використанням даних супутникового приладу Ozone Monitoring Instrument (OMI) [6], що встановлений на супутнику Aura. Значення з просторовою роздільною здатністю  $1 \times 1^\circ$  виокремлено для області в межах від  $21.5^\circ$  сх.д. до  $41.5^\circ$  сх.д. та від  $43.5^\circ$  пн.ш. до  $53.5^\circ$  пн.ш. За необхідності аналізу причин появи значних відхилень від середніх багаторічних значень область досліджень розширювалася до масштабів півкулі.

Нормою у дослідженнях вважаємо середні багаторічні значення ЗВО за період 1981–2010 рр., обчислену за даними супутникових приладів OMI (2005–2010 рр.) та TOMS (1981–2004 рр.). Перевірка рядів на однорідність за допомогою параметричного (Стюдента) та непараметричного (Колмогорова-Смірнова) крите-

ріїв однорідності із 95%-им рівнем забезпеченості результату показали однорідність та можливість об'єднання вибірок. Для території України залежно від сезону норма ЗВО змінюється в межах від 280 о.Д. до 380 о.Д.

Аналіз відхилень значень ЗВО від норми проведено за абсолютними показником у о.Д. (відхилення результатів вимірювання від багаторічної норми), та за відносним показником представлених у одиницях стандартних відхилень ( $\sigma$ ), що являє собою відношення абсолютного відхилення до стандартного відхилення часового ряду за період 1981–2010 рр. Аномальними є значення, що відхиляються від норми більше ніж на  $\pm 2.5\sigma$  [5]. За абсолютними значеннями аномальні відхилення можуть відрізнятися протягом року в зв'язку із сезонними різницями у концентраціях озону.

Щодобовий моніторинг здійснюється автоматизованими програмними модулями, написаними на мові VB.NET та включають у себе викачку даних, розшифрування файлів, виокремлення області досліджень, обчислення відхилень від норми, архівування та візуалізацію результатів.

Аналіз ультрафіолетового опромінення та показника УФ-індексу здійснено за методикою огляду 2018 року [4] з використанням моделі описаної у [7,8]. УФ-індекс виражається у безрозмірних одиницях (позначимо б.о.).

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

У 2019 році ЗВО над територією України характеризувався значеннями, що мало відхилялися від норми 1981–2010 рр. та переважно знаходилися в межах 260–370 о.Д. (рис. 1). Візуалізацію здійснено для міст Київ та Одеса у зв'язку із розташуванням на півночі та півдні території України, що дає змогу відобразити відмінності широтного розподілу ЗВО. У порівнянні з 2018 р. [4] зменшилися розкид значень та кількість значних відхилень, що перевищували  $2\sigma$ . На рис. 2 зображено часовий хід широтних перерізів ЗВО для різних довгот:  $22.5^\circ$  (західна частина України),  $28.5^\circ$  та  $34.5^\circ$  (центральна частина України),  $40.5^\circ$  (східна частина України).

Протягом січня 2019 р. ЗВО в середньому знаходився в межах від 340 о.Д. до 350 о.Д. з широтною залежністю зміни концентрацій: вищими значеннями на півночі України та меншими на півдні. Подібний просторовий розподіл та найбільше зростання концентрацій озону є характерною особливістю циркуляції Брюера-Добсона в стратосфері, що підсилюється взимку у Північній півкулі [9]. У глобальному розподілі

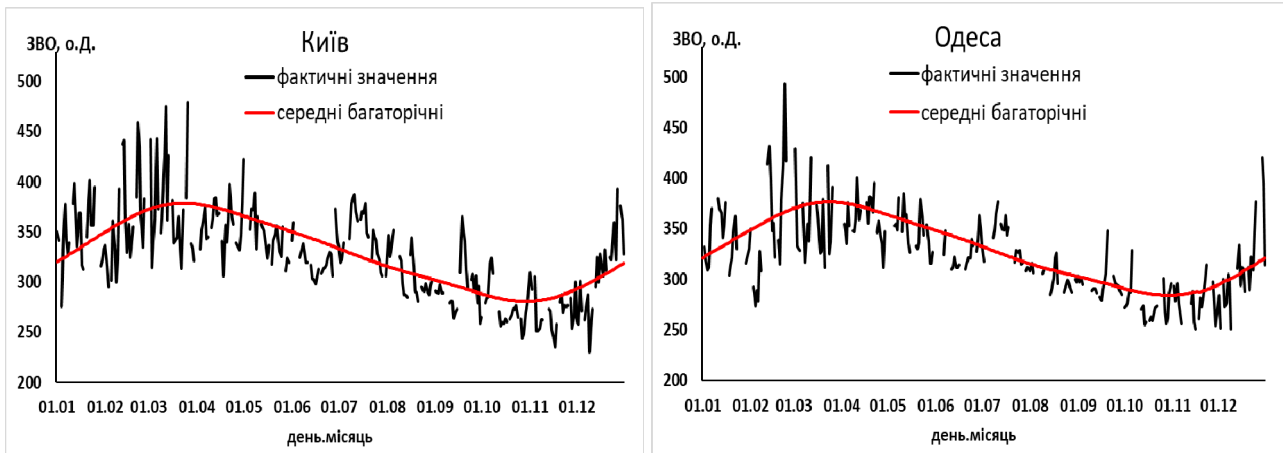


Рис. 1 – Динаміка ЗВО над Києвом та Одесою у 2019 році

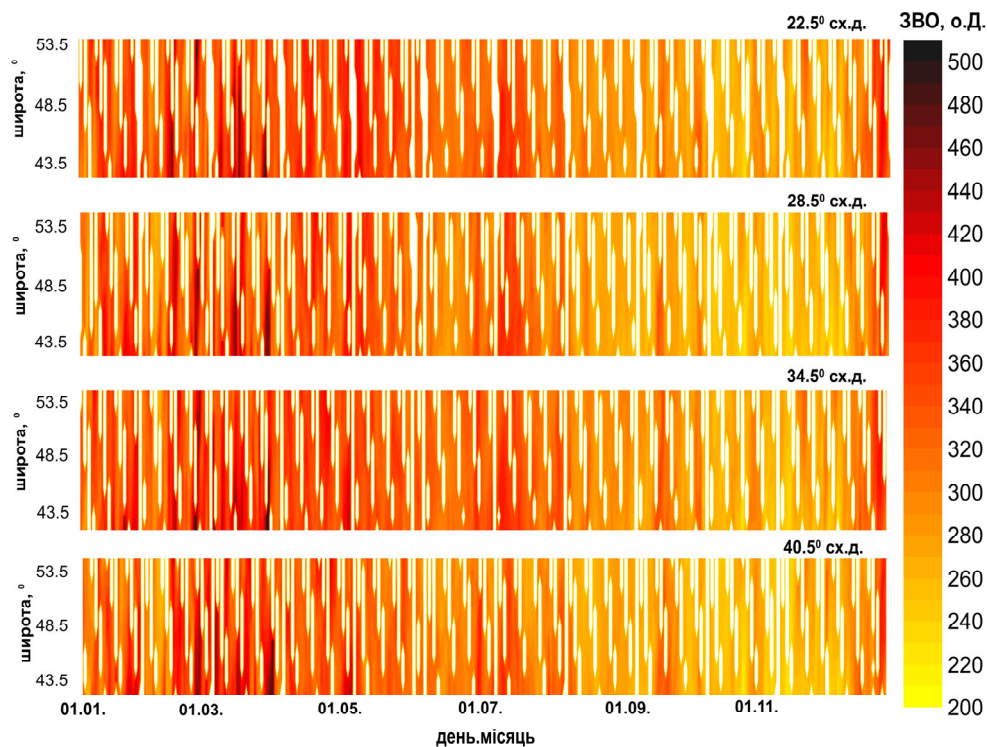


Рис. 2 – Сезонно-широтний розподіл ЗВО за 2019 рік на різних довготах (білим кольором зображено відсутні дані)

найбільша кількість озону утворюється у тропічних широтах, де кількість сонячної радіації найбільша [9]. Із тропічних широт озон переноситься циркуляцією Брюера-Добсона до полюсів, де озон накопичується. Найінтенсивніше такий процес відбувається протягом холодного періоду в Північній півкулі, що зумовлює стрімке зростання ЗВО у січні з чітким збільшенням концентрацій у напрямку на північ [1]. Кількість сонячної радіації, що сприяє утворенню і руйнуванню озону через механізм Чепмена, в цей час найменша та перешкоджає руйнуванню молекул озону, концентрації якого продовжують зростати

через надходження з тропічних широт. В результаті над територією України за січень 2019 ЗВО збільшився в середньому на 30 о.Д. Середні відхилення від норми дорівнювали 4–22 о.Д., що в січні відповідає близько 0.1–0.5 $\sigma$ .

У лютому та березні для ЗВО над територією України була характерна найбільша нестабільність, значний розкид значень та поява відхилень близьких до аномальних. Попри значні варіації ЗВО в цей період, сезонні особливості сприяють формуванню найвищого вмісту, що в середньому у лютому 2019 р. досягав 330–360 о.Д., у березні 355–380 о.Д. Такі значення

у лютому–березні є близькими до норми та не перевищують відхилень у  $\pm 0.5\sigma$ . При цьому максимальні відхилення ЗВО в окремі періоди перевищували на 2.5–2.9 $\sigma$  навіть настільки високу сезонну норму, досягаючи за абсолютними значеннями 500 о.Д.

У першій половині лютого відхилення переважно були негативні, а найменші значення спостерігалися на півдні України. Протягом 4–7 лютого ЗВО дорівнював 270–280 о.Д., що на 70–80 о.Д. нижче норми, та у лютому відповідає близькому до аномального відхиленню у  $-2\sigma$ . В середині–кінці лютого почав спостерігатися новий процес, що сприяв підвищенню ЗВО вже до позитивних відхилень більше  $2\sigma$ . Поряд із продовженням інтенсивної циркуляції Брюера-Добсона, почала спостерігатися перебудова полярного вихору, що у верхній тропосфері–нижній стратосфері високих широт призводить до появи низхідних рухів. Це призводить до того, що із вищих шарів атмосфери спостерігати надходження додаткової кількості атомарного кисню та, в цілому, сполук  $O_x$  [2]. Подібні процеси призводять до додаткового підвищення кількості озону в атмосфері полярних широт через інтенсифікацію хімічних реакцій утворення озону. У цей же час в помірних широтах, в тому числі і над територією України, можуть спостерігатися вторгнення повітряних мас з півночі, що збагачені озоном [10, 11]. Це призводить до формування так званого типу D вертикального розподілу озону, що характеризується найвищими значеннями в межах 450–500 о.Д. пов'язаному із наявністю двох максимумів у вертикальному розподілі [10]. Перший максимум концентрацій озону, що розташовується вище, сформований процесами над помірними широтами, другий максимум формується у полярних широтах. Під час просування повітряних мас на південь, другий максимум опиняється нижче (у верхній тропосфері). Перебуваючи при цьому певний час у хімічній рівновазі, другий максимум може існувати декілька днів [10].

В результаті подібних процесів над територією України спостерігалися високі (більше  $2\sigma$ ) та аномальні (більше  $2.5\sigma$ ) значення ЗВО: 23–24 лютого над усією територією України, 2 березня над східними, північно-східними та центральними районами України, 12–14 березня над західними районами та 26 березня над північними. У вказані дати на висотах формувалася затік повітря на територію України із північного-заходу, де ЗВО був вищим.

За період з січня до березня рівень УФ-опромінення був низьким у зв'язку із незначним

надходженням сонячного випромінювання (сезонні мінімуми та висока повторюваність хмарного неба) та високими значеннями ЗВО, що абсорбує УФ-опромінення. Максимальні значення УФ-індексу не перевищували 3 б.о. (рис. 3), що за наявною класифікацією та рекомендаціями [3] відповідає низькому рівню УФ-опромінення.

ЗВО у квітні та травні в середньому знаходився у межах від 345 о.Д. до 365 о.Д. Такі значення у квітні були на 9–25 о.Д. (відхилення близько  $-0.2...-0.5\sigma$ ) нижчими за багаторічну норму, проте у травні вирівнюються із нормою. У порівнянні з початком весни розкид значень ЗВО зменшився. Послаблення циркуляції Брюера-Добсона з переходом до теплого періоду року призводить до поступового сезонного зменшення ЗВО.

УФ-індекс у першій половині квітня встановився на межі 3–4 б.о. Подальше збільшення кількості сонячної радіації у поєднанні з нижчими рівнями ЗВО могло б призвести до підвищення УФ-індексу до градації середніх значень близько 5 б.о. Це чітко видно із розрахунку теоретично можливих значень УФ-індексу, що відповідають умовам безхмарного неба (рис. 3). Проте, наявність хмарності у цей час сприяла коливанню значень УФ-індексу в межах 3–4 б.о.

Поступове сезонне зменшення ЗВО та збільшення кількості сонячної радіації у травні призводить до збільшення повторюваності УФ-індексу близько 5 б.о., що за класифікацією є останнім значенням із області середніх.

Для курортно-санаторних цілей подібні значення вже передбачають застосування елементарних методів захисту та профілактики у поїздки години: перебування в тіні з метою уникнення сонячних опіків, носіння головного убору та сонцезахисних окулярів, заборону проводити оздоровчі процедури під відкритим сонцем або перенесення на більш ранні/пізні години дня [3].

У червні–липні 2019 р. ЗВО в середньому коливався в межах 320–350 о.Д. з меншими значеннями у червні та вищими у липні. Загалом для літнього сезону характерне підвищення інтенсивності фотохімічних реакцій руйнування озону, що разом із послабленням меридіонального обміну через більш однорідне прогрівання над тропічними та полярними широтами призводить до зменшення ЗВО [12].

Подібна динаміка ЗВО спостерігалася у червні, проте у липні, замість очікуваного зменшення концентрацій, почалося підвищення ЗВО. Це спостерігалася більшу частину липня із середніми значеннями на 6–25 о.Д. вище норми (пози-

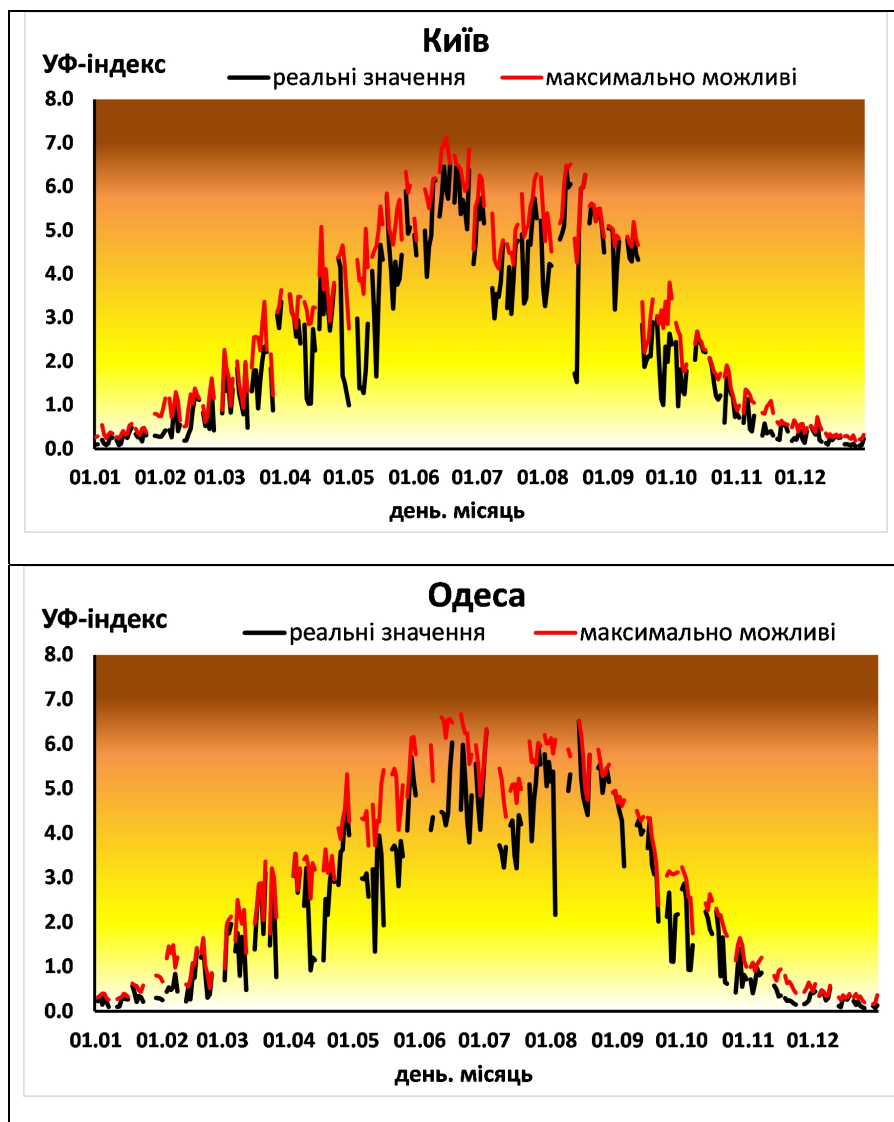


Рис. 3 – Динаміка УФ-індексу над деякими містами України у 2019 році

тивні відхилення на  $0.1 \dots 0.5\sigma$ ). Враховуючи, що інтенсивність фотохімічного руйнування в цей час можна вважати стабільною, а підвищені значення ЗВО характеризувалися широтною залежністю, можна зробити висновок про роль циркуляційних умов. Проте, аналіз розподілу ЗВО над північною півкулею не дав можливості виявити причини підвищеного вмісту ЗВО у липні, тому виявлення конкретних механізмів потребує додаткових досліджень із залученням даних радіозондування та наземних спостережень за ЗВО над територією Європи.

В результаті УФ-індекс досягав найбільших значень у червні, тоді як у липні значення відповідали показникам квітня–травня. Максимальні значення УФ-індексу в червні не перевищили 7, тобто не досягли показників із області дуже високих значень, що вимагають уникати перебу-

вання під відкритим сонцем протягом більшої частини дня. У липні УФ-індекс коливався в межах 3–5 б.о., що навіть за умов безхмарного неба (максимально можливі значення на рис. 3) не перевищували б значення 6 б.о.

У серпні ЗВО зменшився до 298–310 о.Д. та мало відхилявся від норми (відносні відхилення в межах  $0 \dots -0.2\sigma$ ). Для цього періоду характерне продовження сезонного зменшення концентрацій озону внаслідок фотохімічних реакцій як за механізмом Чепмена, так і за участю нітрогено-, воднево- та хлоровмісних сполук. УФ-індекс збільшився у порівнянні із липнем, проте максимальні значення лише протягом одного дня перевищили 6 б.о.

Своїх мінімальних сезонних значень ЗВО досяг протягом вересня–жовтня, зменшившись до 285–301 о.Д. у вересні та до 265–280 о.Д. у жов-

тні. Подібні концентрації є типовими та не перевищують норму більше ніж 15 о.Д. за абсолютним значенням (в середньому мінімальні відхилення близько  $-0.3\sigma$ ). Процеси формування сезонних мінімумів ЗВО у вересні–жовтні мають динамічну природу. У цей час спостерігається різке зменшення кількості сонячного випромінювання та прогрівання полярних широт північної півкулі. У зв'язку з цим починає формуватися полярний вихор, що перешкоджає меридіональному перенесенню озону із більш низьких широт [13].

УФ-індекс поступово зменшується до низьких значень на рівні 2–3 б.о. ЗВО та сезонні процеси його зменшення у вересні–жовтні вже не є визначальними для рівнів УФ-опромінення у зв'язку зі зменшенням кількості сонячного випромінювання. Навіть за середніх значень ЗВО близько 260–270 о.Д., теоретичні максимально можливі значення УФ-індексу за безхмарного неба не перевищували б 4 б.о., фактичні ж були на рівні 3 о.

Протягом листопада–грудня 2019 р. почалося збільшення ЗВО, пов'язане з інтенсифікацією циркуляції Брюера-Добсона, та наприкінці року досяг середніх значень 310–315 о.Д., що відповідали багаторічній нормі для цього періоду. 27–28 грудня почали з'являтися перші високі значення ЗВО нового зимового сезону, що були близькими до позитивних аномальних відхилень та досягали 2.0–2.4 $\sigma$ .

В результаті, середньорічні значення ЗВО за 2019 рік характеризуються широтним розподілом та збільшенням значень у напрямку на північ (рис. 4А). Такий розподіл являє собою типову узагальнену картину сформовану меридіональним перенесенням озону через циркуляцію Брюера-Добсона. Деяке поширення ізоліній вглиб на південь є результатом впливу періодів зі значними позитивними відхиленнями ЗВО, сформованими в результаті виносу повітряних мас з півночі.

Просторовий розподіл максимальних значень за 2019 рік вкрай неоднорідний (рис. 4Б). Локалізації з аномальними значеннями відображають ті території, на які у лютому–березні переміщувалися на висотах збагачені озоном повітряні маси. Необхідно мати на увазі, що подібні процеси адвекції повітряних мас відбуваються швидко, і тому між сусідніми строками супутникового зондування, об'єми повітря із високими концентраціями озону встигають пройти значну

відстань. Це і зумовлює неоднорідність розподілу на карті максимальних значень. Так наприклад, максимуми ЗВО вище 490 о.Д. на півдні України отримані у момент проходження супутника. Ці ж концентрації пройшли шлях з півночі на південь від попереднього часу зондування.

Мінімальні значення ЗВО за 2019 рік збільшуються у напрямку на південь (рис. 4В). Чіткий широтний розподіл зумовлений формуванням полярного вихору, під час якого у високих широтах формуються негативні відхилення ЗВО.

#### 4. ВИСНОВКИ

Більшу частину 2019 р. ЗВО над територією України коливався в межах 260–370 о.Д. з відсутністю значних негативних відхилень. Значні позитивні відхилення спостерігалися на початку року у зв'язку із сукупністю процесів інтенсифікації циркуляції Брюера-Добсона, перебудовою полярного вихору та адвекцією повітряних мас на висотах на територію України з північного заходу. Це призвело до формування позитивних аномальних відхилень ЗВО 23–24 лютого над усією територією України, 2 березня над більшою частиною території України, 12–14 березня над західними районами та 26 березня над північними. Максимальні значення досягали 500 о.Д.

Протягом квітня–червня 2019 р. відбувалося сезонне зменшення ЗВО та поступове збільшення УФ-опромінення, що досягло найвищих значень у середині–кінці червня, коли УФ-індекс досягав 6 б.о., проте не перевищував небезпечні межі у 7 б.о. У липні рівні УФ-опромінення зменшились у зв'язку із нехарактерним для літнього сезону збільшенням ЗВО на 25 о.Д. (близько 0.5 $\sigma$ ).

Із серпня до листопада спостерігалось сезонне зменшення концентрацій озону, пов'язаних із процесами фотохімічного руйнування у серпні та формуванням й інтенсифікацією полярного вихору у осінній сезон. Найменші значення ЗВО над територією України спостерігалися у жовтні (260–270 о.Д.), проте такий вміст є типовим для цього періоду. У середньому відносні відхилення не були нижчими за  $-0.3\sigma$  від норми.

Сезонне збільшення ЗВО почалося у листопаді; перші значні позитивні відхилення (в межах 2–2.4 $\sigma$ ) – в кінці грудня.

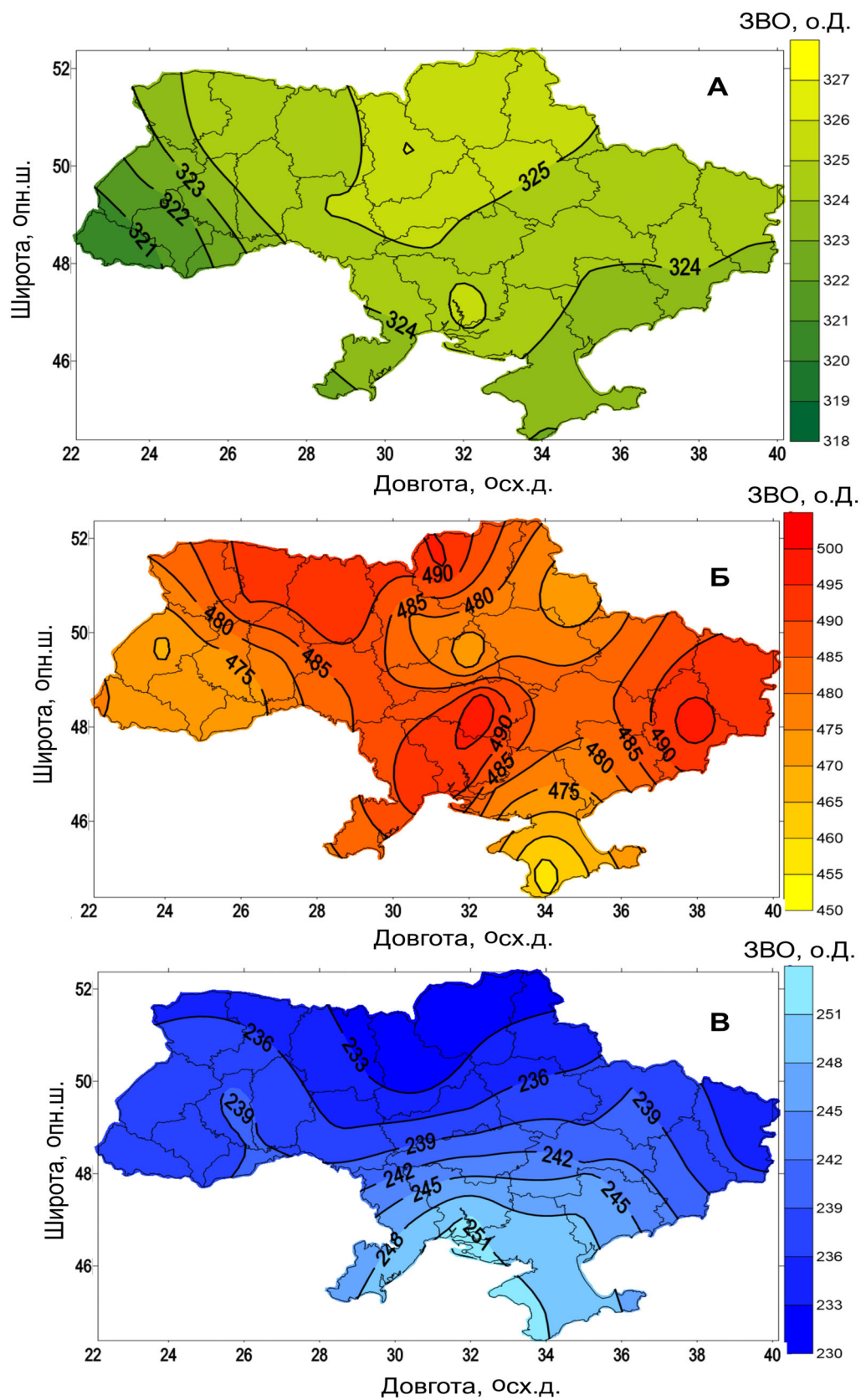


Рис. 4 – Просторовий розподіл середніх (А), максимальних (Б) та мінімальних (В) значень ЗВО за 2019 рік над територією України

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fabian P., Dameris M. *Ozone in the Atmosphere: Basic Principles, Natural and Human Impacts*. Springer, 2014. 144 p.
2. Dessler A. *The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone*. International Geophysics Series. Vol. 74. Academic Press, 2005. 255 p.
3. Global solar UV index: a practical guide. A joint recommendation of WHO, WMO, UNEP, ICMIRP / World Health Organization. 2002. 18 p.
4. Огляд стану озонового шару та рівня ультрафіолетового опромінення над територією України у 2018 році / Дворецька І. В., Савенець М. В., Уманець А. П. та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 23. С. 34–41. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.04>
5. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2002 році. Київ : Мінекології. 2002. 164 с.
6. NASA Ozone Watch. URL: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (Accessed: 08.01.2020)
7. Эмпирическая модель для расчета солнечной ультрафиолетовой облученности по данным измерений, выполненных в ходе Второй Украинской Антарктической экспедиции / Белявский А. В. Грищенко В. Ф., Крученицкий Г. М. и др. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 1999. Вип. 247. С. 30–36
8. Savenets M., Dvoretzka I., Kruchenitskiy G. The method for prediction of total ozone and ultraviolet radiation over Ukraine based on satellite data. *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2016*, 26–30 September. Darmstadt, Germany, 2016. URL: [https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_FILE&dDocName=ZIP\\_CONF\\_2016\\_S6\\_POSTERS&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Renderition=Web](https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=ZIP_CONF_2016_S6_POSTERS&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Renderition=Web) (Accessed: 30.12.2019)
9. How is total ozone distributed over the globe? URL: <https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2010/twentyquestions/Q4.pdf> (Accessed: 08.01.2020)
10. Хргиан А. Х. Физика атмосферного озона. Ленинград : Гидрометеоиздат. 1973. 293 с.
11. Євтушевський О. М. Довготривала залежність сезонних змін загального вмісту озону в середньопівнічній атмосфері північної півкулі. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2014. № 3. С. 49–58
12. Cordeco E. C., Kawa S. R. Ozone and tracer transport variations in the summer Northern Hemisphere stratosphere. *Journal of Geophysical Research*. 2001. 106(D11). P.12,227–12,239
13. Polar vortex emerges over the North Pole. URL: <https://www.severe-weather.eu/news/polar-vortex-emerges/> (Accessed: 08.01.2020)

## REFERENCES

1. Fabian, P. & Dameris, M. (2014). *Ozone in the Atmosphere: Basic Principles, Natural and Human Impacts*. Springer.
2. Dessler, A. (2005). *The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone*. International Geophysics Series. Vol. 74. Academic Press.
3. World Health Organization (2002). *Global solar UV index: a practical guide. A joint recommendation of WHO, WMO, UNEP, ICMIRP*.
4. Dvoretzka, I.V., Savenets, M.V., Umanets, A.P. et al. (2019). [Examination of the ozone layer condition and level of ultraviolet irradiation within the territory of Ukraine in 2018]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, (23), 34-41. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.04> (in Ukr.)
5. Ministry of Ecology of Ukraine (2002). *Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnioho pryrodnoho seredovyschcha v Ukraini v 2002 rotsi [National report on the environment in Ukraine in 2003]*. Kyiv. (in Ukr.)
6. NASA Ozone Watch. Available at: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (Accessed: 08.01.2020)
7. Belyavskiy, A., Grishchenko, V., Kruchenitskiy, G. et al. (1999). Empiricheskaya model dlya rascheta ultrafiolotovoy obluchennosti po dannym izmereniy, vypolnennykh v khode Vtoroy Ukrainской Antarkticheskoy ekspeditsii [Empirical model for solar UV-irradiance calculation based on Second Antarctic Expedition data]. *Naukovi pratsi UkrNDGMI. [Scientific papers of UkrSRHMI]*, 243, pp. 30–36 (in Russ.)
8. Savenets, M., Dvoretzka, I. & Kruchenitskiy, G. (2016). The method for prediction of total ozone and ultraviolet radiation over Ukraine based on satellite data. *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2016*, 26–30 September, Darmstadt, Germany. Available at: [https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_FILE&dDocName=ZIP\\_CONF\\_2016\\_S6\\_POSTERS&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Renderition=Web](https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=ZIP_CONF_2016_S6_POSTERS&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Renderition=Web) (Accessed: 10.01.2019)
9. How is total ozone distributed over the globe? Available at: <https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2010/twentyquestions/Q4.pdf> (Accessed: 08.01.2020)
10. Khrgian, A.H. (1973). *Fizika atmosfernogo ozona [The physics of atmospheric ozone]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
11. Yevtushevskiy, O.M. (2014). [Longitudinal Dependence of Seasonal Changes of Total Ozone Content in the Northern Midlatitudinal Atmosphere]. *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannia Zemli [Ukrainian Journal of Remote Sensing]*, 3, pp. 49–58 (in Ukr.)
12. Cordeco, E.C. & Kawa, S.R. (2001). Ozone and tracer transport variations in the summer Northern Hemisphere stratosphere. *Journal of Geophysical Research*, 106(D11), 12,227–12,239.
13. Polar vortex emerges over the North Pole. Available at: <https://www.severe-weather.eu/news/polar-vortex-emerges/> (Accessed: 08.01.2020)

## OZONE LAYER STATE AND LEVEL OF ULTRAVIOLET IRRADIANCE OVER THE TERRITORY OF UKRAINE IN 2019

M. V. Savenets<sup>1</sup>, I. V. Dvoretzka<sup>1</sup>, A. P. Umanets<sup>1</sup>, N. V. Grechana<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ukrainian Hydrometeorological Institute, 37, Nauky Pr., 03028 Kyiv, Ukraine,  
[savenetsm@gmail.com](mailto:savenetsm@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

<sup>2</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13 Volodymyrska St., 01601, Kyiv, Ukraine

The paper presents main results of total ozone column (TOC) and levels of ultraviolet irradiance daily monitoring conducted for the Ukrainian territory in 2019. Monitoring and analysis were performed using TOC data measured by the satellite Ozone Monitoring Instrument (the OMI) and estimated values of ultraviolet index. The research was made on the regular grid with 1° spatial resolution and separately for geographical coordinates of centers of Ukrainian administrative regions. In 2019 the TOC ranged within a multiyear average standard with and its average value was equal to 260–360 D.u. During winter ozone concentration reached its highest values due to intensification of Brewer-Dobson circulation. Weakened polar vortex and ozone-rich air masses advection at the upper atmospheric levels which transport high ozone concentrations, resulted in the TOC positive anomalies emergence over Ukraine. The air masses penetrated Ukrainian territory from the north-west and this led to emergence anomalously high TOC values during a number of periods: February 23–24, March 2, March 12–14, March 26. In these periods 450–500 D.u. was a typical ozone content. Seasonal TOC decrease, observed from April to June, was caused by a weakened Brewer-Dobson circulation and intensification of photochemical ozone loss. Nevertheless, TOC deviations from average standard were negligible and this resulted in absence of very high UV-index values. The highest UV-index values did not reach 7 units. In July the TOC was slightly higher than usual concentrations, which was probably caused by dynamic factors. Such TOC values influenced the level of ultraviolet irradiance and the UV-index varied within 3–4 units' range which is typical for Ukraine in April–May. Such ozone state in 2019 made it impossible for UV-index to reach extremely high levels, especially during the summer period. Further TOC changes were characterized by typical seasonal ozone decrease with minimum values observed in October resulted from formation and intensification of polar vortex. Average minimum values in October amounted to 260–270 D.u., however, it is a typical TOC content for this period with a relative deviation from the standard constituting about  $-0.3\sigma$ . Seasonal ozone increase in 2019 started in mid-November. At the end of December the first high positive deviations happened. The highest of them reached close to anomalous  $2-2.4\sigma$  values.

**Keywords:** total ozone content, ultraviolet irradiance, UV-index, anomaly, deviation

## СОСТОЯНИЕ ОЗОНОВОГО СЛОЯ И УРОВНЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ УКРАИНЫ В 2019 ГОДУ

М. В. Савенец<sup>1</sup>, И. В. Дворецкая<sup>1</sup>, А. П. Уманец<sup>1</sup>, Н. В. Гречаная<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС  
Украины и НАН Украины, пр. Науки, 37, 03028, Киев, Украина,  
[savenetsm@gmail.com](mailto:savenetsm@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

<sup>2</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,  
ул. Владимирская 64/13, 01601, Киев, Украина

В статье представлены результаты ежесуточного мониторинга состояния озонного слоя и уровней ультрафиолетовой облученности территории Украины в 2019 году. Для мониторинга и анализа использованы данные общего содержания озона (ОСО), измеренные спутниковым прибором Ozone Monitoring Instrument (OMI), а также рассчитанные значения ультрафиолетового индекса. Исследование проведено на регулярной сетке с пространственным разрешением 1° и отдельно для географических координат центров

административных областей Украины. В 2019 г. ОСО варьировался в пределах многолетней нормы и в среднем был равен 260–360 е.Д. В зимний сезон концентрации озона были наиболее высокими, что обусловлено интенсивной циркуляцией Брюера-Добсона. Ослабление полярного вихря и адвекция богатого озоном воздуха на высотах с северо-запада обусловили появление аномально высоких значений ОСО в период 23–24 февраля, 2 марта, 12–14 марта и 26 марта, во время которых ОСО увеличивался до 450–500 е.Д. Сезонное уменьшение ОСО, обусловленное ослаблением циркуляции Брюера-Добсона и интенсификацией фотохимических реакций разрушения озона, наблюдалось с апреля по июнь. Однако, отклонения ОСО от нормы были незначительными, в результате чего отсутствовали очень высокие значения УФ-индекса, который не достигал 7 единиц. Июль характеризовался более высокими концентрациями озона, что наиболее вероятно обусловлено динамическими факторами, в результате чего УФ-индекс колебался в пределах 3–4 единиц. Результатом таких вариаций ОСО стало отсутствие экстремально высоких уровней ультрафиолетовой облученности в летнее время 2019 г. В последующие месяцы наблюдалось типичное сезонное уменьшение ОСО, которое достигло минимальных значений в октябре в результате формирования и интенсификации полярного вихря. В среднем наименьшие значения достигли 260–270 е.Д., однако эти отклонения близки к норме с относительными отклонениями около  $-0.3\sigma$ . Сезонное увеличение ОСО в 2019 г. началось в середине ноября. Уже в конце декабря начали наблюдаться первые значительные позитивные отклонения, которые достигли близких к аномальным значений  $2-2.4\sigma$ .

**Ключевые слова:** общее содержание озона, ультрафиолетовая облученность, УФ-индекс, аномалия, отклонение

*Подання до редакції : 25. 01. 2020*  
*Надходження остаточної версії : 13. 03. 2020*  
*Публікація статті : 03. 07. 2020*

УДК : 633.171 : 58.056

## ВПЛИВ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА УРОЖАЙНІСТЬ ПРОСА В ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

Н. В. Данілова

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [nataliadanilova0212@gmail.com](mailto:nataliadanilova0212@gmail.com)

Негативний вплив зміни клімату на урожайність сільськогосподарських культур є встановленим фактом. Переважно пояснюється це підвищенням рівня температур і ростом ймовірності посушливих явищ. Проте в деяких регіонах відзначається збільшення врожайності окремих культур, насамперед, посухостійких, що визначає необхідність проведення досліджень агрокліматичних умов формування урожайності таких культур.

В даній статті представлено результати дослідження агрокліматичних умов формування урожаїв проса, як однієї із найбільш посухостійких сільськогосподарських культур, в Лісостеповій зоні України у зв'язку зі зміною клімату. Розглядаються температурний і радіаційний режими та режим зволоження посівів проса. Дослідження впливу зміни клімату на ріст, розвиток і формування урожаю проса проводяться за сценаріями майбутніх кліматичних змін RCP4.5 і RCP8.5 за тридцятирічний період (2021-2050 рр.) у розрізі трьох десятиріч: 2021– 030 рр., 2031– 2040 рр., 2041–2050 рр. Як базовий розглядається період з 1986 по 2005 рр., за який використовуються середні багаторічні агрокліматичні дані в Лісостеповій зоні України. Розрахунки виконувались із застосуванням моделі формування продуктивності сільськогосподарських культур, яка була модифікована та адаптована стосовно до культури проса. Блок-схема моделі формування продуктивності проса включає блоки основних фізіологічних процесів життєдіяльності проса (*Panicum miliaceum* L.): фотосинтезу, дихання, росту, розвитку, а також гідрометеорологічний блок. Припускається, що середня температура повітря знизиться у всі три десятирічні періоди за обома сценаріями, в порівнянні з прийнятими середніми багаторічними величинами. Результати розрахунків показали, що в усі десятирічні періоди за обома сценаріями, порівняно з середніми багаторічними даними (1986-2005 рр.), відзначається збільшення урожайності проса. Найвищий урожай формується за сценарієм RCP8.5 в період з 2041 по 2050 рр. і очікується на рівні 29,2 ц/га, що вище від поточного на 19%.

**Ключові слова:** просо; продовольча безпека; зміна клімату; кліматичні сценарії; урожайність; агрокліматичні показники; моделювання посівів.

## 1. ВСТУП

Зміна клімату є важливою екологічною, соціальною та економічною проблемою. Клімат суттєво впливає на формування врожаю сільськогосподарських культур. Підвищення температури та зниження кількості опадів призведуть до зменшення врожайності [1].

Зернові культури, насамперед, пшениця і кукурудза, відносять до основних культур, які використовуються для харчування більшості населення в усьому світі. До 2050 року продовольчий попит на зернові має зрости на 70-100%, щоб забезпечити прогнозоване населення світу в 9,8 мільярда чоловік [2]. Ця проблема ще більш ускладнюється різким скороченням кількості родючих і орних земель, доступних для вирощування вказаних культур, які, як очікується, будуть продовжувати зменшуватися в майбутньому через сучасні технології ведення сільського

господарства [3, 4].

Дуже важливо розуміти, що клімат змінюється також і по всій Україні, але ці зміни розрізняються по регіонам. Причина полягає у значній площі України і різноманітності природних умов, які й зумовлюють нерівномірність прояви кліматичних змін.

До негативних наслідків впливу змін клімату на сільське господарство України слід також віднести вірогідність збільшення в період вегетації сільськогосподарських культур посух та поширення цього явища у райони, які традиційно належать до достатньо зволених - Полісся і північні райони Лісостепу [5].

Встановлено, що в Лісостеповій зоні темпи підвищення температури вище, ніж в Степовій зоні [6]. Тому, зважаючи на зростання посушливості в Лісостеповій зоні України, виникає потреба розширення посівів

сільськогосподарських культур, які менш вимогливі до умов зволоження. До таких культур відноситься просо. Тому дослідження метеорологічних умов на розвиток проса в Україні є дуже актуальним.

За даними [7] просо є шостим найважливішим злаком, який вирощується в усьому світі і є традиційною культурою в Центральній, Східній, Південній та Західній Африці, особливо в Сахелі, Індії й Пакистані, та уздовж південного узбережжя Аравійського півострова. Таку сільськогосподарську культуру як просо вирощуються в районах, де водні ресурси в дефіциті. Крім того, просо з його високою толерантністю до біотичних та абіотичних стресів, в т.ч., високим рівнем максимальних температур і потенціалом формувати врожай в таких умовах, можна вирощувати в напівпосушливих і посушливих районах на низькоякісних землях з мінімальним вкладенням. Просо можна вирощувати на бідних піщаних ґрунтах і воно добре підходить для сухого клімату завдяки своїй здатності ефективно використовувати вологу – його транспіраційний коефіцієнт значно нижчий, ніж у кукурудзи і майже вдвічі менший, порівняно з озимою пшеницею та ярим ячменем. Все відзначене свідчить про необхідність розширення посівних площ цієї культури за рахунок скорочення культур з більш високим транспіраційним коефіцієнтом. Тому, *метою представленого дослідження є визначення особливостей агрокліматичних умов у зв'язку зі зміною та їх вплив на урожайність проса в Лісостеповій зоні України.*

## 2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Аграрний сектор є надзвичайно важливим для України. У зв'язку з цим для забезпечення стійкого розвитку економіки України підвищення уваги до кліматичного фактору у досягненні стабільності врожайності сільськогосподарських культур у сучасних кліматичних умовах є необхідним і своєчасним. Тому необхідно приділяти більше уваги дослідженням в області адаптації та пом'якшення наслідків, нарощування потенціалу, змін в політиці, національному або регіональному співробітництву та підтримки фондів адаптації та інших ресурсів для зведення до мінімуму несприятливих наслідків [8, 9].

Так, наприклад, Неверовим А. А. вперше розроблено математичні моделі зв'язку тренду врожайності проса з кліматичними факторами і врожайності з погодними умовами в

Оренбурзькій області [10].

Для території Індії Jena P. R. та Kalli R. [11] запропоновано регресійна модель для виявлення причинно-наслідкового зв'язку між змінами врожаю та клімату (кількість опадів та температура).

В країнах Африки на південь від Сахари (SSA) [12] оцінюється вплив зміни клімату на врожайність для чотирьох найбільш поширених культур - просо, кукурудза, сорго та маніоку. Модель містить блоки з даними про температуру повітря й опади за середньобаторічний період 1961-2002 рр. Урожайність до 2100 року прогнозується шляхом порівняння оцінок середньобаторічних даних з прогнозами майбутніх змін клімату (в країнах Африки на південь від Сахари (GCM).

У роботі [13] досліджено тенденції та залежності між опадами та сільським господарством у провінції Кассала Східного Судану з 1960 по 1990 рік. Були побудовані часові ряди за даними щорічних опадів і врожайності сорго, проса та кунжуту.

Метою досліджень [14] було оцінити вплив зміни клімату на просо для напівпосушливої Африки. Майбутні кліматичні сценарії, отримані з кліматичних моделей CMIP5, були побудовані із застосуванням прогнозованих змін температури і кількості опадів в Сенегалі. Усі поширені кліматичні моделі прогнозують підвищення температури в майбутньому, а прогнозована кількість опадів може як збільшуватися, так і зменшуватися, в залежності від моделі. З метою зменшення невизначеності в кліматичних прогнозах, були об'єднані різні прогнози опадів на 1985, 2050 або 2080 за гіпотезою радіаційного впливу (RCP8.5 або RCP2.6). Модель культури CELSIUS була спеціально розроблена для імітації культури проса, вирощеної в умовах суворих і помірних обмежень за поживними речовинами.

Використовуючи трирічні експериментальні дані по кукурудзі і просу на півдні Малі в Судано-Сахеліанській зоні Західної Африки, дослідники [15] протестували модель симулятора сільськогосподарських виробничих систем (APSIM). Зміни майбутніх опадів, максимальної і мінімальної температури та їх вплив на врожайність кукурудзи і проса були проаналізовані за допомогою п'яти моделей циркуляції (GCM) для сценаріїв радіаційного впливу RCP4.5 та RCP8.5.

У дослідженнях [16] оцінювався вплив температури, підвищеної на 1,5 °C і 2,0 °C за двома моделями на врожайність кукурудзи, проса та сорго в Західноафриканській савані Судану. До-

слідження проводились як для рівня поточного використання добрив, так і для випадку інтенсифікації.

В Україні дослідження щодо культури проса почали проводитись в 60-і роки. Здебільшого вони були присвячені вивчення агротехнічних умов вирощування проса. В останні десятиріччя збільшилась кількість досліджень, в яких розглядаються в основному сортовий склад проса, агротехніка його вирощування, в т.ч., внесення добрив та способів посіву. На жаль, детальних досліджень агрометеорологічних умов вирощування проса по різних природних зонах України не проводилось.

В дослідженнях Рудник-Іващенко О. І. та Григоращенко Л. В. [17] для території України визначено райони біологічно можливого й економічно виправданого вирощування проса за термічним фактором. Встановлено оптимальні умови розвитку цієї культури за водним і температурним режимами. Визначено залежність ознак урожайності від кліматичних умов за міжфазні періоди розвитку сортів.

Полторецьким С. П. [18] удосконалено елементи технології вирощування високоякісного насіння проса шляхом оптимізації строків і способів сівби, спрямованих на підвищення врожайності і поліпшення його насіннєвих якостей в умовах нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу.

В роботі Комі Джіджону Аттіла та Бука А. Я. [19] вперше для чорноземів опідзолених важко-суглинкових лівобережного Лісостепу України розроблена ресурсозберігаюча технологія допосівного локального застосування мінеральних добрив сіялками СЗ-3,6 під просо, яка дозволяє одержувати стабільні врожаї високоякісного зерна за найвищої (15,7 кг/кг NPK) окупності приростами врожаїв одиниці внесених туків.

Уперше для умов південного Степу України Шевель В. І. розроблені елементи технології вирощування проса, які забезпечують формування продуктивності культури на основі нових вітчизняних високопродуктивних сортів, адаптованих до посушливих умов, зменшення витрат за рахунок мінімізації хімічного навантаження із застосуванням розрахункової дози добрив та оптимального строку сівби [20].

Полторецьким С. П. та Карпенко В. П. [21] було вдосконалено технології вирощування високоякісного насіння проса шляхом оптимізації рівня азотного живлення на фосфорно-калійному фоні, для забезпечення підвищення врожайності і поліпшення посівних якостей на-

сіння різних сортів в умовах нестійкого зволоження південної частини Правобережного Лісостепу.

Холод С. Г. [22] проводились дослідження на базі Устимівської дослідної станції рослинництва (Полтавська обл.), було встановлено величину впливу погоднокліматичних умов за міжфазні періоди на ступінь реалізації генетичного потенціалу продуктивності різних зразків проса.

В роботі Данілової Н. В. [23] розглядалися зміни агрокліматичних ресурсів та агрокліматичних умов формування продуктивності проса за різні проміжки часу в південних областях України. Проведена порівняльна характеристика урожайності проса в умовах зміни клімату за середньобаторічними даними (1986-2005 рр.) та за сценаріями зміни клімату А2 і А1В (2011-2030 рр. та 2031-2050 рр.).

### 3. ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вихідними матеріалами для проведення досліджень були дані середніх багаторічних агрокліматичних показників за період 1986 – 2005 рр. [24]. Для розрахунку впливу зміни клімату на умови розвитку формування врожаю проса були використані сценарії RCP4.5 та RCP8.5, які характеризують відповідно збільшення і зменшення викидів CO<sub>2</sub>. [25]. Тридцятирічний сценарний період розбивався на три десятирічних з метою оцінки динаміки зміни кліматичних умов: 2021 – 2030 рр. (I-й сценарний період), 2031 – 2040 рр. (II-й сценарний період), 2041 – 2050 рр. (III-й сценарний період).

Далі розрахунки виконувались із застосуванням моделі формування урожайності сільськогосподарських культур, розробленої А. М. Польового [26]. Ця модель була нами модифікована та адаптована стосовно до культури проса. Основними блоками моделі є:

- блок вхідної інформації;
  - блок показників сонячної радіації і вологотемпературного режиму з урахуванням експозиції поля;
  - блок функцій впливу фази розвитку та метеорологічних факторів на продукційний процес рослин;
  - блок родючості ґрунту та забезпеченості рослин мінеральним живленням;
  - блок агроекологічних категорій урожайності.
- Враховуючи біологічні особливості культури проса, дозрівання якої проходить трьома етапами, нами моделюються три фази дозрівання зер-

на проса у волоті;

-- блок узагальнюючих оціночних характеристик.

Блок вхідної інформації містить дані стандартних метеорологічних і агрометеорологічних спостережень та усі необхідні для виконання розрахунків характеристики. Вони поділяються на три групи:

Перша група – запаси продуктивної вологи у ґрунті, середньодекадна температура повітря, середня за декаду кількість годин сонячного сяйва, сума опадів за декаду, середній за декаду дефіцит насичення повітря, кількість днів у розрахунковій декаді.

Друга група – інформація про внесення азотних, фосфорних і калійних добрив, дані про оптимальні дози цих добрив, дані про внесення органічних добрив та їхній оптимальний дозі, рік внесення органічних добрив, бал ґрунтового бонітету.

Третя група – інформація про експозицію та крутість схилу, на якому розташоване поле, характеристика типу схилу і місця розташування поля на схилі.

Блок агроєкологічних категорій урожайності містить різні розрахункові показники продуктивності проса. Приріст потенційної урожайності за декаду визначається в залежності від інтенсивності фотосинтетично активної радіації ( $\Phi AP$ ) і біологічних особливостей культури, які описуються онтогенетичною кривою,  $KKД$  та калорійність. Приріст метеорологічно можливої урожайності являє собою приріст потенційної урожайності, який буде обмежений впливом волого-температурного режиму.

Функція впливу волого-температурного режиму визначається через розгляд функції впливу температури повітря і функції впливу вологозабезпеченості.

Формування дійсно можливої урожайності обмежується рівнем природної родючості ґрунту. Одержання рівня господарської урожайності обмежується реально існуючим рівнем культури землеробства й ефективністю внесених мінеральних і органічних добрив.

Функція ефективності внесення добрив розглядається за принципом Лібіха як мінімальне з функції впливу органічних добрив і кожного з мінеральних добрив, що вносяться: азотних, фосфорних і калійних.

Для розрахунків різних агроєкологічних категорій урожаю зерна за його стандартній 14 %-вої вологості використаний показник  $K_{госп}$ , який характеризує частку зерна в загальній масі урожаю. Узагальнюючі характеристики розрахо-

вують на основі співвідношень агроєкологічних категорій урожайності.

Адаптація моделі полягала в уточненні параметрів моделі. До їх числа входить визначення онтогенетичної кривої фотосинтезу, в якій параметр  $\Sigma t_l$  характеризує період, коли спостерігається максимальна інтенсивність фотосинтезу культури.

При розрахунку функції впливу температури повітря на продукційний процес рослин використовуються два параметри, які характеризують нижню ( $T_{opt1}$ ) (11,2–13,8 °C) та верхню межу ( $T_{opt2}$ ) (22,8–22,7 °C) температурного оптимуму для фотосинтезу. Ці оптимальні величини мають вегетаційний хід і відмінні для різних ґрунтово-кліматичних зон.

Для оцінки впливу вологості ґрунту на фотосинтез використовуються показники нижньої ( $W_{opt1}$ ) (62–102 мм) та верхньої ( $W_{opt2}$ ) (111–126 мм) межі оптимальних значень вологості ґрунту. Відповідно біологічним особливостям культури проса, як нижня межа оптимальної вологості приймається величина, яка дорівнює 60% від НВ, а за верхню межу приймається величина НВ. Ці величини визначені за даними агрогідрологічних обстежень гідрометеорологічних станцій України.

За оптимальне значення вмісту гумусу в ґрунті було прийнято величину 5%, яка використовується у розрахунках впливу родючості ґрунту на формування урожаю.

В моделі враховуються оптимальні дози внесення азотних, фосфорних та калійних добрив, а також оптимальна норма внесення органічних добрив. Як оптимальні дози мінеральних добрив прийняті рекомендовані значення, які складають: для азотних добрив – 50-70 кг/га; для фосфорних – 30-70 кг/га; для калійних – 30-70 кг/га.

При розрахунку приростів потенційної урожайності загальної біомаси використовуються величини:  $KKД$  посіву та калорійність, які дорівнюють відповідно 1% та 3 кал/кг.

Для розрахунку рівня господарської урожайності використовується величина коефіцієнту, що характеризує рівень культури землеробства і господарської діяльності. Цей коефіцієнт було знайдено як відношення рівня господарської урожайності до урожайності і в середньому він дорівнює 0,7.

Розрахунок урожайності зерна проса виконується з врахуванням особливостей дозрівання, яке проходить у цієї культури в три етапи. У зв'язку з цим введена величина коефіцієнту  $k_{дозр}^i$ , який характеризує долю дозрілого зерна в волоті в кожному із трьох фаз

дозрівання. Величина цього коефіцієнту за трьома фазами оцінюється відповідно як 0,4; 0,35; 0,25.

Визначені параметри моделі стосовно до культури проса дозволяють провести перевірку її адекватності та використовувати в подальшому для агрокліматичних розрахунків.

Перевірка адекватності моделі велась шляхом співставлення розрахованої величини господарської урожайності.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В процесі моделювання були отримані показники агрокліматичних умов за вегетаційний період проса та показники його продуктивності за середньобаторічними величинами показників світла, тепла і вологи за базовий період з 1986 по 2005 рр. та за сценаріями RCP4.5 та RCP8.5.

Надходження фотосинтетично активної радіації ( $\Phi AP$ ) за період сходи – повна стиглість за сценарієм RCP4.5 в І-е й ІІ-е десятиріччя зростає до 153,6 та 150,9 кДж/см<sup>2</sup>, що складає 118 та 116% від середнього багаторічного. В ІІІ-е десятиріччя  $\Phi AP$  зростає до 158,1 кДж/см<sup>2</sup> і складатиме 122% (табл. 1). Потенційний урожай ( $ПУ$ ) всієї сухої маси залежить від  $\Phi AP$ . В І-у та ІІ-у десятиріччя  $ПУ$  зростає до 1711 та 1681 г/м<sup>2</sup>дек, тобто до 118 та 116% від базового періоду (1447 г/м<sup>2</sup>дек) (табл. 2). У зв'язку із найбільшою  $\Phi AP$  в ІІІ-е десятиріччя відзначається найвищий рівень  $ПУ$  - до 1832 кДж/см<sup>2</sup>, що складає 126%.

Температурний режим за сценарієм RCP4.5 буде дещо зниженим і становитиме в І-е та ІІ-е десятиріччя 15,8 та 15,9 °С, а в ІІІ-е десятиріччя температура знизиться до 16,2 °С, в порівнянні з середньою багаторічною в 17,3 °С (табл. 1).

Кількість опадів в базовий період (1986-2005рр.) дорівнює 323 мм. В І-е та ІІІ-е десятиріччя сума опадів знизиться до 231 та 277 мм. Сумарне випаровування знизиться в ці десятиріччя відповідно до 312 та 329 мм, в порівнянні з базовим періодом в 401 мм. Відповідно зменшиться і випаровуваність до 480 та 525 мм від 552 мм в базовий період. За середніми багаторічними даними відносна вологозабезпеченість посівів ( $E/E_0$ ) складає 0,73 відн.од. Із-за зменшення кількості опадів в виділені десятирічні періоди очікуються гірші умови вологозабезпеченості. У І-е та ІІІ-е десятиріччя відзначається зменшення  $E/E_0$  до 0,65 та 0,63 відн.од. в порівнянні з базовим.

В ІІ-е десятиріччя сума опадів зростає до 301 мм, в порівнянні з І-м та ІІІ-м десятиріччя-

ми, але меншою, ніж за базовий період (табл. 1). Сумарне випаровування в ІІ-е десятиріччя складатиме 312 мм, а випаровуваність 437 мм. В ІІ-й десятирічний період спостерігається підвищення суми опадів, порівняно з І-м та ІІІ-м періодами, що зумовить кращі умови вологозабезпеченості посівів проса– 0,71 відн.од. (табл. 1).

Із рис. 1 видно, що за сценарієм RCP4.5 рівень динаміки площі листя за вказані десятирічні періоди буде нижчим, порівняно з базовим періодом. Площа листової поверхні в період її максимального розвитку зменшиться з 4,94 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> до 4,7 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> в І-е десятиріччя, до 4,69 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> - в ІІ-е десятиріччя до 4,63 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> в ІІІ-е десятиріччя.

Фотосинтетичний потенціал ( $\Phi П$ ) (табл. 2) за всі розрахункові десятиріччя набуває максимального значення в кінці вегетаційного періоду. За середньо багаторічними даними (1986-2005рр.)  $\Phi П$  складає 297,7 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>. За вказані десятирічні періоди відзначається зниження  $\Phi П$  до 296,7 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> в І-е десятиріччя, до 296,6 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> - в ІІ-е і до 289,6 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> - в ІІІ-е.

За умовами реалізації сценарію RCP4.5 метеорологічно можливий урожай ( $ММУ$ ) в І-е та ІІ-е десятиріччя зростає до 957 та 959 г/м<sup>2</sup>дек, що складає 107% від базового періоду (897 г/м<sup>2</sup>дек). Із-за кращих умов тепло- та вологозабезпеченості в ІІ-е десятиріччя зростає і  $ММУ$  до 1003 г/м<sup>2</sup>дек, що складає 112% від базового періоду (табл. 2).

З урахуванням природної родючості ґрунту рівень дійсно можливий урожай ( $ДМУ$ ) всієї сухої маси проса також зростає до 574 г/м<sup>2</sup>дек (107%) та 575 г/м<sup>2</sup>дек (107%) в І-е і ІІІ-е десятиріччя в порівнянні з базовим періодом - 538 г/м<sup>2</sup>дек. В ІІ-е десятиріччя  $ММУ$  зростає до 602 г/м<sup>2</sup>дек, що складає 112% від середнього багаторічного.

За умовами сценарію RCP4.5 урожай проса за 14%-ї вологості в базовий період становить 24,5 ц/га. В І-й та ІІІ-й розрахункові десятиріччя він зростає до 26,2 ц/га і складатиме 107%, а в ІІ-е - до 27,4 ц/га і складатиме 112% від середнього багаторічного (табл. 2).

Баланс гумусу під посівами проса складатиме в І-е та ІІІ-е десятиріччя зростає до 108%, а в ІІ-у - до 112%, в порівнянні з середньо багаторічним (табл. 2).

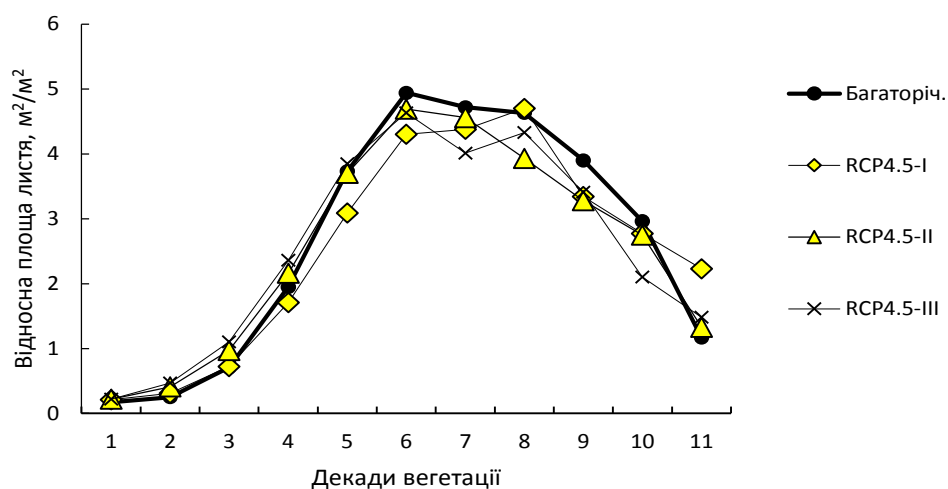
За сценарієм RCP8.5 середня температура повітря в період сходи – повна стиглість в І-у й ІІ-у десятиріччя складає 15,7 та 15,5 °С, що на 1,6 та 1,8 °С нижче в порівнянні з середньобаторічним значенням. А в ІІІ-е десятиріччя температура повітря буде складати 15,4 °С, що нижче від середньо багаторічної на 1,9 °С.

**Таблиця 1** – Характеристика показників агрокліматичних умов за період вегетації проса в базовий період (1986-2005 рр.) та за розрахункові періоди за сценаріями зміни клімату RCP4.5 та RCP8.5 в Лісостепу (період сходи – повна стиглість).

| Період, сценарій | Середня температура повітря за період, °C | Сума опадів за період, мм | Сумарне випаровування за період (E), мм | Випаровуваність за період, (E <sub>0</sub> ), мм | Відносна вологозабезпеченість (E/E <sub>0</sub> ), відн.од. | Сума ФАР, кДж/см <sup>2</sup> за період |
|------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1986-2005        | 17,3                                      | 323                       | 401                                     | 552                                              | 0,73                                                        | 129,9                                   |
| RCP4.5:          |                                           |                           |                                         |                                                  |                                                             |                                         |
| 2021-2030        | 15,9                                      | 231                       | 312                                     | 480                                              | 0,65                                                        | 153,6                                   |
| 2031-2040        | 15,8                                      | 301                       | 312                                     | 438                                              | 0,71                                                        | 150,9                                   |
| 2041-2050        | 16,2                                      | 277                       | 329                                     | 525                                              | 0,63                                                        | 158,1                                   |
| RCP8.5:          |                                           |                           |                                         |                                                  |                                                             |                                         |
| 2021-2030        | 15,7                                      | 303                       | 329                                     | 508                                              | 0,65                                                        | 163,7                                   |
| 2031-2040        | 15,5                                      | 285                       | 349                                     | 527                                              | 0,66                                                        | 156,6                                   |
| 2041-2050        | 15,4                                      | 378                       | 357                                     | 477                                              | 0,77                                                        | 166,0                                   |

**Таблиця 2** – Характеристика урожайності проса за базовий період (1986-2000 рр.) та за розрахункові десятиріччя за сценаріями зміни клімату RCP4.5 та RCP8.5 в Лісостепу

| Період, Сценарій | Вся суха маса, г/м <sup>2</sup> дек |                                 |                         | Фотосинтетичний потенціал, м <sup>2</sup> /м <sup>2</sup> за період | Баланс гумусу, т/га | Урожай проса при вологості 14 %, ц/га |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|
|                  | потенційного урожаю                 | метеорологічно можливого урожаю | дійсно можливого урожаю |                                                                     |                     |                                       |
| 1986-2005        | 1447                                | 897                             | 538                     | 240,2                                                               | 0,075               | 24,5                                  |
| RCP4.5:          |                                     |                                 |                         |                                                                     |                     |                                       |
| 2021-2030        | 1711                                | 957                             | 574                     | 312,9                                                               | 0,051               | 26,2                                  |
| 2031-2040        | 1681                                | 1003                            | 602                     | 292,3                                                               | 0,053               | 27,4                                  |
| 2041-2050        | 1829                                | 959                             | 575                     | 326,0                                                               | 0,051               | 26,2                                  |
| RCP8.5:          |                                     |                                 |                         |                                                                     |                     |                                       |
| 2021-2030        | 1823                                | 1025                            | 615                     | 358,0                                                               | 0,054               | 28,1                                  |
| 2031-2040        | 1803                                | 990                             | 594                     | 311,0                                                               | 0,053               | 27,1                                  |
| 2041-2050        | 1849                                | 1067                            | 640                     | 353,0                                                               | 0,057               | 29,2                                  |

**Рис. 1** - Динаміка площі листя проса за вегетаційний період в порівнянні середніх багаторічних та сценарних розрахункових даних за сценарієм RCP4.5 в Лісостепу

Треба відмітити, що за сценарієм RCP8.5 температурний режим буде нижчим не тільки від середньо багаторічної температури, а й за сценарієм RCP4.5.

За I-й та II-й розрахункові періоди сума опадів знизиться на 20 й 38 мм і тільки в III-й період зросте на 146 мм, порівняно з середнім багаторічним.

Сумарне випаровування в I-й та II-й періоди зменшиться з 401 мм до 329 та 349 мм, а в III-й період - до 357 мм. Випаровуваність зменшиться з 552 мм в I-й та II-й періоди до 508 й 527 мм, а в III-й період - до 477 мм. Мала кількість опадів в I-й та II-й періоди погіршить і умови вологозабезпеченості посівів проса до 89 та 90%. В III-й період збільшення кількості опадів зумовить покращення умов вологозабезпеченості проса до 102% (табл. 1).

Площа листя (рис. 2), за умов реалізації сценарію RCP8.5, буде нижчою, порівняно з базовим періодом. Так, в I-й та II-й розрахункові періоди площа листової поверхні в період її максимального розвитку зменшиться з 4,94 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> до 4,56 та 4,72 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>. В III-й період через кращих умов вологозабезпеченості очікується ріст листової поверхні до 4,81 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

ФП, за умовами реалізації сценарію RCP8.5, буде вищим, в порівнянні з базовим періодом та за сценарієм RCP4.5, і складатиме в I-й період 314,8 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>, в II-й період - 300,4 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>, а в III-й період - 315,7 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> (табл. 2).

За умови реалізації сценарію RCP8.5 в порівнянні з базовим періодом спостерігається ріст

ММУ. В I-у та II-у десятиріччя ММУ зросте до 1025 та 990 г/м<sup>2</sup>дек, що складатиме 114 та 110% від ММУ в базовий період. В III-ю десятиріччя у зв'язку з покращенням умов вологозабезпеченості, буде спостерігатись найвищий ММУ – 1067 г/м<sup>2</sup>дек, що складатиме 119% від базових (табл. 2).

ДМУ в I-й та II-й періоди очікується на рівні 114 та 110%, а в III-й період зросте до 119% від середнього багаторічного.

За сценарієм RCP8.5 урожай проса за 14%-ї вологості в I-й та II-й періоди складатиме 28,1 та 27,1 ц/га, що становить 115 та 111% від середньо багаторічного. В III-є десятиріччя урожай проса зросте до 29,2 ц/га, тобто до 119% від середньо багаторічного. З розрахунків видно, що урожай проса за сценарієм RCP8.5 буде вищим від середньо багаторічного та від урожаю за сценарієм RCP4.5 (табл. 2).

Баланс гумусу під посівами проса складатиме в I-й та II-й періоди 115 та 111%, а в III-й період – 120% (табл. 2).

Отримані результати свідчать, що у всі розрахункові десятиріччя, порівняно з базовим періодом (1986-2005 рр.), очікується зниження середньої температури повітря до оптимальної, що призведе до підвищення урожайності. Найвищий урожай проса відзначається за сценарієм RCP8.5 в період з 2041 по 2050 рр. при оптимальній температурі повітря і достатній вологозабезпеченості й складає 29,2 ц/га, що вище урожаю за базовий період на 19%.

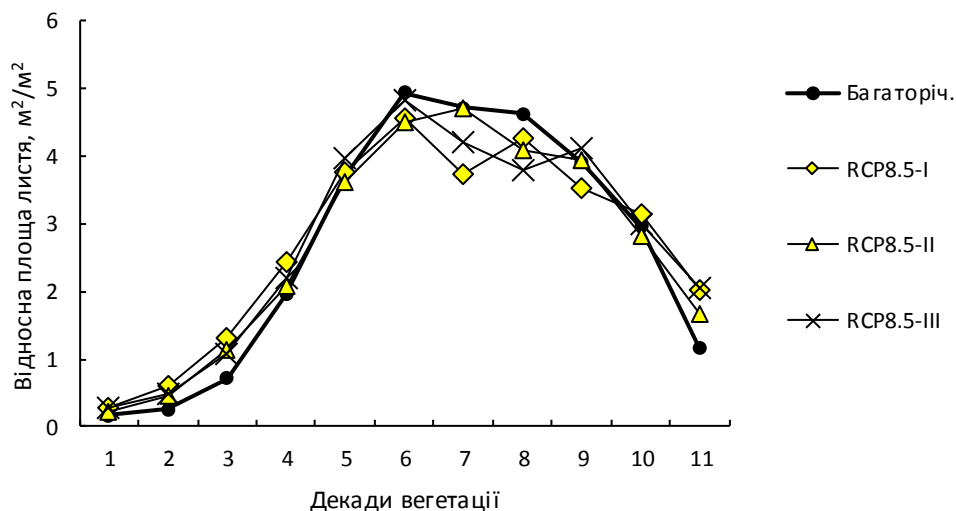


Рис. 2 - Динаміка площі листя проса за вегетаційний період в порівнянні середніх багаторічних та сценарних розрахункових даних за сценарієм RCP8.5 в Лісостепу

Таким чином, за нашими результатами встановлено, що на відміну від Бузулуцького району Оренбургської області [10], країн Африки [12-16], південного штату Індії [11] на території України очікується підвищення врожайності проса, що також відповідає результатам, представленим в [19, 20, 22].

## 5. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень із використанням сценаріїв зміни клімату RCP4.5 і RCP8.5 та методу моделювання формування продуктивності проса для Лісостепу України отримано нові дані, які вказують на зміну ресурсів світла, тепла і вологи за вегетаційний період. Виявлено різницю в кількісних величинах як агрокліматичних умов, так і показників продуктивності проса за вказаними сценаріями в базовий період (1986-2005 рр.) і в найближчі десятиріччя (2021-2030, 2031-2040, 2041-2050 рр.). За обома сценаріями зміни клімату встановлено тенденцію підвищення врожайності проса на 19%.

Дослідження у цьому напрямку і отримані результати можуть використовуватися при перегляді видового й сортового складу сільського подарських культур та оптимізації їх розміщення на конкретних територіях.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Marcos A. Orellana. Climate Change and the Millennium Development Goals. *International journal on human rights*. 2010. 12. Pp. 145-172. URL: [http://www.undp.org/climatechange/cc\\_mdgs.shtml](http://www.undp.org/climatechange/cc_mdgs.shtml) (Accessed: 25 october 2019)
- Godfray H. C. J. et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*. 2010. 327. Pp. 812-818. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1185383>.
- Hawkesford M. J. et. al. Prospects of doubling global wheat yields. *Food Energy Secur.* 2013. 2. Pp. 34-48. <https://doi.org/10.1002/fes3.15>.
- Asseng S., Foster I., Turner N. C. The impact of temperature variability on wheat yields. *Glob. Chang. Biol.* 2011. 17. Pp. 997-1012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02262.x>.
- Стефановська Т. Р., Підліснюк В. В. Оцінка вразливості до змін клімату сільського господарства України. *Екологічна безпека*. 2010. №9. С. 62-66.
- Адаменко Т. І. Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату. Київ: ТОВ «РІА»БЛІЦ. 2014. 18 с.
- The World Sorghum and Millet Economies: Facts, Trends, and Outlook. *A joint study by the Basic Foodstuffs Service FAO Commodities and Trade Division and the Socio-economics and Policy Division International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics*. 1996. 68 с.
- Mall R. K, Gupta A., Sonkar G. Effect of Climate Change on Agricultural Crops. *J. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. 2017. 2. Pp. 23-46.
- Muthamilarasan M., Prasad M. Advances in Setaria genomics for genetic improvement of cereals and bioenergy grasses. *Theor. Appl. Genet.* 2015. 128. Pp. 1-14.
- Неверов А. А. Компьютерное моделирование связи урожая проса с погоднo-климатическими условиями западной зоны Оренбургской области. *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН (электронный журнал)*. 2017. №1. С. 10.
- Jena P. R., Kalli R. Measuring the Impact of Climate Variability on Rice and Finger Millet: Empirical Evidence from a Drought Prone Region of India. *J. Agricultural Economists*. July 28 – august 2. 2018. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.275970>.
- Elodie Blanc. The Impact of Climate Change on Crop Yields in Sub-Saharan Africa. *American Journal of Climate Change*. 2012. 1(1). Article ID:18072,13 Pp. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2012.11001>.
- Larsson H. Relationships between Rainfall and Sorghum, Millet and Sesame in the Kassala Province, Eastern Sudan. *Journal of Arid Environments*. 1996. 32(2). Pp. 211-223. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0018>.
- Rising nutrient availability may have much more impact than climate change on pearl millet in Senegal. / Garcia Leo at al. *Agriculture and Climate Change "Climate ready resource use-efficient crops to sustain food and nutritional security": Elsevier conference*, 26/28 March. Sitges, Espagne, 2017.
- Traore Bouba Sidi et al. Modelling cereal crops to assess future climate risk for family food self-sufficiency in southern Mali. *Field Crops Research*. 2017. 201. Pp. 133-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.11.002>
- Babacar Faye et al. Impacts of 1.5 versus 2.0 °C on cereal yields in the West African Sudan Savanna. *Environ. Res. Lett.* 2018. 13. <https://doi.org/article/10.1088/1748-9326/aaab40>.
- Рудник-Іващенко О. І., Григорашенко Л. В. Залежність ознак урожайності проса від впливу кліматичних умов за фазами розвитку. *Селекція і насінництво*. 2010. № 98. С. 244-256.
- Полторецький С. П. Особливості формування густоти насінницьких посівів сортів проса залежно від строку і способу сівби в умовах правобережного Лісостепу. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2013. № 82. С. 29-37.
- Коми Джиджону Аттила, Бука А. Я. Усовершенствование технологии применения минеральных удобрений под просо на черноземе оподзоленном левобережной Лесостепи Украины. *Наук. зб. Агрохімія і ґрунтознавство. Спец. вип. до V з'їзду УТГА (6-10 липня 1998 р., м. Рівне). Ґрунти-екологія-продовольство. Частина друга*. Харків, 1998. С. 146-147.
- Шевель В. І. Оцінка фотосинтетичної діяльності проса в умовах південного Степу України. *Таврійський науковий вісник*. 2016. №96. С. 129-134.
- Полторецький С. П., Карпенко В. П. Посівні якості та врожайні властивості насіння проса за різного рівня азотного живлення. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. Ч.1. Агрономія*. 2012. №80. С. 159-169.
- Холод С. Г. Залежність урожайності проса та її елементів від агрокліматичних умов зони вирощування. *Вісник Центру наукового забезпечення агропромислового виробництва Харківської області*. 2016. №20. С. 75-83.

23. Данілова Н. В. Оцінка зміни агрокліматичних умов вирощування проса в південних областях України в зв'язку зі зміною клімату. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. №17. С. 93-101. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.11>
  24. Агрокліматичний довідник по території України / за ред. Т. І. Адаменко, М. І. Кульбіди, А. Л. Прокопенко. Кам'янець-Подільський, 2011. С. 107.
  25. The impact of emission and climate change on ozone in the United States under representative concentration pathways (RCPs) / Y. Gao<sup>1</sup>, J.S. Fu, J.B. Drake, J.F. Lamarque, Y. Liu. *Atmos. Chem. Phys.* 2013. №13. Pp. 607-621.
  26. Польовий А. М. Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агроєкосистем. Київ: КНТ, 2007. С. 344.
- ## REFERENCES
1. Marcos, A. Orellana. (2010). Climate Change and the Millennium Development Goals. *International journal on human rights*, 12, pp. 145-172. Available at: [http://www.undp.org/climatechange/cc\\_mdgs.shtml](http://www.undp.org/climatechange/cc_mdgs.shtml) (Accessed: 25 october 2019)
  2. Godfray, H.C.J. et al. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, pp. 812-818. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1185383>.
  3. Hawkesford, M.J. et al. (2013). Prospects of doubling global wheat yields. *Food Energy Secur.*, 2, pp. 34-48. <https://doi.org/10.1002/fes3.15>.
  4. Asseng, S., Foster, I. & Turner, N.C. (2011). The impact of temperature variability on wheat yields. *Glob. Chang. Biol.*, 17, pp. 997-1012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02262.x>.
  5. Stefanovska, T.R. & Pidlisniuk, V.V. (2010). [Assessment of vulnerability to climate change in agriculture of Ukraine]. *Ekologichna bezpeka [Ecological security]*, 9, pp. 62-66. (in Ukr.).
  6. Adamenko, T.I. (2014). *Ahroklimatychne zonuvannia terytorii Ukrainy z vrakhovanniam zminy klimatu [Agroclimatic zoning of the territory of Ukraine taking into account climate change]*. Kyiv: TOV «RIA»BLITs (in Ukr.).
  7. The World Sorghum and Millet Economies: Facts, Trends, and Outlook. (1996). *A joint study by the Basic Foodstuffs Service FAO Commodities and Trade Division and the Socioeconomics and Policy Division International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics*.
  8. Mall, R.K., Gupta, A. & Sonkar G. (2017). Effect of Climate Change on Agricultural Crops. *J. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 2, pp. 23-46.
  9. Muthamilarasan, M. & Prasad, M. (2015). Advances in Setaria genomics for genetic improvement of cereals and bio-energy grasses. *Theor. Appl. Genet.*, 128, pp. 1-14.
  10. Neverov, A.A. (2017). [Computer simulation of the connection of millet harvest with weather and climatic conditions of the western zone of the Orenburg region]. *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo centra UrO RAN (elektronnyy zhurnal) [Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (electronic journal)]*, 1, pp. 10
  11. Jena, P.R. & Kalli, R. (2018). Measuring the Impact of Climate Variability on Rice and Finger Millet: Empirical Evidence from a Drought Prone Region of India. *J. Agricultural Economists*. July 28 – august 2. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.275970>
  12. Elodie Blanc. (2012). The Impact of Climate Change on Crop Yields in Sub-Saharan Africa. *American Journal of Climate Change*, 1(1). Article ID:18072, 13 p. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2012.11001>.
  13. Larsson, H. (1996). Relationships between Rainfall and Sorghum, Millet and Sesame in the Kassala Province, Eastern Sudan. *Journal of Arid Environments*, 32(2), pp. 211-223. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0018>.
  14. Garcia, Leo et al. (2017). Rising nutrient availability may have much more impact than climate change on pearl millet in Senegal. *Elsevier conference: Agriculture and Climate Change "Climate ready resource use-efficient crops to sustain food and nutritional security"*, 26/28 March. Sitges, Espagne.
  15. Traore, Bouba Sidi et al. (2017). Modelling cereal crops to assess future climate risk for family food self-sufficiency in southern Mali. *Field Crops Research*, 201, pp. 133-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.11.002>
  16. Babacar, Faye et al. (2018). Impacts of 1.5 versus 2.0 °C on cereal yields in the West African Sudan Savanna. *Environ. Res. Lett.*, 13. <https://doi.org/article/10.1088/1748-9326/aaab40>.
  17. Rudnyk-Ivashchenko, O.I. & Hryhorashchenko, L.V. (2010). [Dependence of signs of millet yield on the influence of climatic conditions by phases of development]. *Selektsiia i nasinnytstvo [Breeding and seed production]*, 98, pp. 244-256. (in Ukr.).
  18. Poltoretskyi, S.P. (2013). [Features of formation of density of seed crops of grades of millet depending on term and a way of sowing in the conditions of the right-bank Forest-steppe]. *Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho natsionalnoho univer-sytetu sadivnytstva [Collection of scientific works of Uman National University of Horticulture]*, 82, pp. 29-37. (in Ukr.).
  19. Komi Dzhidzhonu, Attila & Buka, A.Ja. (1998). [Improvement of the technology of using mineral fertilizers for millet on chernozem podzolized on the left-bank Forest-Steppe of Ukraine]. *Nauk.zb. Ahrokhimii i hruntovnavstvo. Spets.vyp. do V zizdu UTHA (6-10 lypnia 1998 r., m. Rivne). Hrunty-ekolohiia-prodovolstvo. Chastyna druha [Scientific collection. Agrochemistry and soil science. Special issue for the V Congress of UTGA (July 6-10, 1998, Rivne). Soils-ecology-food. Part two]*. Kharkiv, pp. 146-147.
  20. Shevel, V.I. (2016). [Estimation of photosynthetic activity of millet in the conditions of the southern steppe of Ukraine]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk [Taurian Scientific Bulletin]*, 96, pp. 129-134. (in Ukr.).
  21. Poltoretskyi, S.P. & Karpenko, V.P. (2012). [Sowing qualities and yield properties of millet seeds at different levels of nitrogen nutrition]. *Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho natsionalnoho universytetu sadivnytstva. Ch.1. Ahronomiia [Collection of scientific works of Uman National University of Horticulture. Part 1. Agronomy]*, 80, pp. 159-169. (in Ukr.).
  22. Kholod, S.H. (2016). [Dependence of millet yield and its elements on agro-climatic conditions of the growing zone]. *Visnyk Tsentru naukovooho zabezpechennia ahropromyslovoho vyrobnytstva Kharkivskoi oblasti [Bulletin of the Center for Scientific Support of Agricultural Production of Kharkiv Region]*, 20, pp. 75-83. (in Ukr.).
  23. Danilova, N.V. (2016). [Assessment of changes in agro-climatic conditions of millet cultivation in the southern regions of Ukraine due to climate change]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 17, pp. 93-101. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.11> (in Ukr.).
  24. Adamenko, T.I., Kulbida, M.I. & Prokopenko, A.L. (Eds). (2011). *Ahroklimatychnyi dovidnyk po terytorii Ukrainy*

- [Agroclimatic reference book for territories of Ukraine]. Kamianets-Podilsk. (in Ukr.).
25. Gao1, Y. at al. (2013). The impact of emission and climate change on ozone in the United States under representative concentration pathways (RCPs). *Atmos. Chem. Phys.* 13, pp. 607-621.
26. Poliovyi, A.M. (2007). *Modeliuvannia hidrometeorologichnoho rezhymu ta produktyvnosti ahroekosystem [Modeling of hydrometeorological regimes and agro-ecosystems' productivity]*. Kyiv: KNT, 344 p.

## CLIMATE CHANGE IMPACT ON MILLET PRODUCTIVITY IN THE FOREST-STEPPE ZONE OF UKRAINE

N. V. Danilova

Odessa State Environmental University  
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, [nataliadanilova0212@gmail.com](mailto:nataliadanilova0212@gmail.com)

Negative impact of climate change on crop yields is already an established fact. This is mainly due to rising temperatures and increasing likelihood of droughts. However, in some regions there is an increase of certain crops yields, especially the drought-resistant ones and this determines the need for research of agro-climatic conditions for formation of such crops' yield.

This article presents the results of the study of agro-climatic conditions for formation of millet crops, one of the most drought-resistant crops in the forest-steppe zone of Ukraine, affected by climate change. It considers temperature, radiation and humidification regimes of millet crops. The research of the impact of climate change on the growth, development and formation of millet crops is conducted according to the scenarios of future climate change RCP4.5 and RCP8.5 for a thirty-year period (2021-2050) divided into three decades: 2021-2030, 2031-2040 and 2041-2050. The period from 1986 to 2005 is a basic period. The average long-term agroclimatic data for the forest-steppe zone of Ukraine observed in this period are used. The calculations were performed using the model of crop productivity formation which was modified and adapted to millet crop. The block diagram of the model of millet productivity formation includes blocks of main physiological processes of millet (*Panicum miliaceum* L.) vital activity: photosynthesis, respiration, growth, development and also includes a hydrometeorological block. It is assumed that the average air temperature will decrease in all three ten-year periods of both scenarios, compared to the accepted long-term averages. The results of calculations showed that in all ten-year periods of both scenarios there is an increase in millet yield compared with the average long-term data (1986-2005). The highest yield is formed according to the RCP8.5 scenario over the period from 2041 to 2050 and is expected at the level of 29.2 c/ha which is 19% higher than the current one.

**Key words:** millet, food security, climate change, climate scenarios, yield, agroclimatic indicators, crop modelling.

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА УРОЖАЙНОСТЬ ПРОСА В ЛЕСОСТЕПИ УКРАИНЫ

Н. В. Данилова

Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [nataliadanilova0212@gmail.com](mailto:nataliadanilova0212@gmail.com)

Отрицательное влияние изменения климата на урожайность сельскохозяйственных культур является установленным фактом. Преимущественно объясняется это повышением уровня температур и ростом вероятности засушливых явлений. Однако в некоторых регионах отмечается увеличение урожайности отдельных культур, прежде всего, засухоустойчивых, что определяет необходимость проведения исследований агроклиматических условий формирования урожайности таких культур.

В данной статье представлены результаты исследования агроклиматических условий формирования урожая проса, как одной из наиболее засухоустойчивых сельскохозяйственных культур, в Лесостепной зоне Украины в связи с изменением климата. Рассматриваются температурный и радиационный режимы и режим увлажнения посевов проса. Исследование влияния изменения климата на рост, развитие и формирование урожая проса проводятся по сценариям будущих климатических изменений RCP4.5 и RCP8.5 за тридцатилетний период (2021-2050 гг.) в разрезе трех десятилетий: 2021-2030, 2031-2040 гг., 2041-2050 гг. Как базовый рассматривается период с 1986 по 2005 гг., за который используются средние многолетние агроклиматические данные в Лесостепной зоне Украины. Расчеты выполнялись с применением модели формирования продуктивности сельскохозяйственных культур, которая была модифицирована и адаптирована применительно к культуре проса. Блок-схема модели формирования продуктивности проса включает блоки основных физиологических процессов жизнедеятельности проса (*Panicum miliaceum* L.): фотосинтеза, дыхания, роста, развития, а также гидрометеорологический блок. Предполагается, что средняя температура воздуха снизится во все три десятилетние периоды по обоим сценариям, по сравнению с принятыми средними многолетними величинами. Результаты расчетов показали, что во все десятилетние периоды по обоим сценариям, по сравнению со средними многолетними данными (1986-2005 гг.), отмечается увеличение урожайности проса. Самый высокий урожай формируется по сценарию RCP8.5 в период с 2041 по 2050 гг. и ожидается на уровне 29,2 ц/га, что выше текущего на 19%.

**Ключевые слова:** просо, продовольственная безопасность, изменение климата, климатические сценарии, урожайность, агроклиматические показатели, моделирование посевов.

Подання до редакції : 07. 11. 2019  
Надходження остаточної версії : 01. 06. 2020  
Публікація статті : 03. 07. 2020

УДК :633.13:631.547

## МОРФОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПАГОНУ ВІВСА ПОСІВНОГО (*AVENA SATIVA* L.) В УМОВАХ ПІВДНЯ УКРАЇНИ

А. О. Ільїна

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [ilina\\_ann@ukr.net](mailto:ilina_ann@ukr.net)

У даній роботі представлено опис та параметри розвитку метамерів пагону вівса, а саме виявлення закономірностей просторово-часової організації послідовного росту наземних вегетативних метамерів пагону вівса та їх частин. Овес має велике значення для сільськогосподарського виробництва і переробної промисловості завдяки унікальному біохімічному складу зерна. Тому дуже важливим є питання вивчення біологічних та морфометричних особливостей вівса. Довжина та площа органів рослини дозволяють встановити ступінь комфортності умов вирощування та визначити, в який саме період життя рослини відбувалися зміни зовнішніх погодних умов. Фітомер є базовим повторювальним будівельно-функціональним блоком пагону вівса. Досліди проводилися у 2013, 2014 та 2018 роках, метеорологічні умови яких значно різнились між собою – 2013 та 2014 рр. були найбільш сприятливими за зволоженням та опадами, в той час як 2018 рік виявився дуже посушливий. В роботі були визначені абсолютна та відносна швидкості росту міжвузля пагону вівса, а також максимальна швидкість росту кожного метамеру в лінійній фазі. За нашими спостереженнями, при температурі від 15°C до 20°C абсолютна швидкість росту вівса була незначна та зростала від 0,01 до 0,5 мм/добу. Проте, коли температура повітря досягала відмітки 20°C, абсолютна швидкість росту зростала від 0,5 мм/добу до майже 2 мм/добу. Також були встановлені суми ефективних температур, за яких відбувається початок та кінець росту кожного міжвузля. Так, перше міжвузля починає свій ріст при накопиченні суми ефективних температур до 117°C, для початку росту волоті необхідно накопичення суми ефективних температур до 668 °C, а при накопиченні суми ефективних температур до 1173 °C зупиняється одночасно ріст сьомого міжвузля та волоті рослини. В онтогенезі пагону вівса спостерігається закономірна послідовність росту та розвитку наземних вегетативних метамерів пагону та їх частин. Тривалість росту міжвузля стебла вівса у середньому за досліджувані роки складає від 9 діб для першого міжвузля до 30 діб для сьомого, та для волоті – 26 діб.

**Ключові слова:** метамер, міжвузля, листова пластина, листова піхва, пагін, розвиток, овес.

### 1. ВСТУП

Підвищення врожайності сільськогосподарських рослин неможливо без всебічного вивчення біологічних та морфометричних особливостей культур. Тому необхідно в кожній конкретній зоні вирощування рослин оцінити реальні агрометеорологічні умови, особливості розвитку фотосинтетичного апарату та вивчити структурний ріст рослини в даних умовах вирощування.

На думку Лазаревича С. В., урожайність вівса посівного, як і інших культур залежить від індивідуальної потенційної продуктивності, їх реакції на умови зростання і від взаємин рослин у складі біоценозу. Але першочергове значення для зернових культур мають морфологічні та анатомічні ознаки, що забезпечують

продуктивність і стійкість рослин до вилягання. [1]. Тому поряд зі стандартними метео- та агрометеорологічними спостереженнями велику увагу треба приділяти морфометричним спостереженням.

Зміни агрометеорологічних умов впливають на швидкість росту молодих погонів рослини і значною мірою впливають на її кінцеві розміри.

Дослідження метамеру як структурної та ростової одиниці пагону має дуже велику актуальність, так як вивчення кожного рівня організації потребує максимального знання особливостей його структурних елементів.

Взаємозв'язок метамерів пагону та їх частин (листової пластини, листової піхви, міжвузля, бокової бруньки та додаткових коренів) визначає структурну єдність рослин [2]. Вивчення морфогенезу вівса дуже важливе для розуміння біології

цієї культури.

Тому в основу досліджень було покладено вивчення загальних закономірностей морфогенезу вівса на макрорівні – на рівні метамеру, пагону та рослини, а саме виявлення закономірностей просторово-часової організації послідовного росту наземних вегетативних метамерів пагону вівса та їх частин.

Загальна кількість фітомерів порівняно постійна для даного пагону злакових та складається з зародкових фітомерів і тих, які знову сформувалися. Під впливом зовнішніх факторів послідовні фітомери закономірно змінюються та після закладення визначеної кількості фітомерів настає закладення суцвіття.

Метою роботи є встановлення часових закономірностей росту та розвитку наземних вегетативних органів вівса.

## 2. УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ, ВИХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Фітомер – це базовий повторюваний будівельно-функціональний блок пагону, який складається з трьох взаємозв'язаних частин: листової пластини – листової піхви – міжвузля з брунькою у основі, якщо міжвузля укорочене. В фітоморфології встановлено, що частини фітомеру ростуть у строгій послідовності: спочатку – листової пластини, листової піхви та закінчує ріст міжвузля [3].

Проведений огляд літератури з вивчення біологічних і морфологічних особливостей росту вівса показує, що це питання є мало вивченим і більшість робіт описує лише окремі його аспекти. Так, біоморфологічний розвиток вівса вивчався у роботах Серебрякової Т. І., Белюченка І. С., Лазаревича С. В., Рожевиці Р. Ю., Yin, X.

Основною структурою злаків є монокарпінний пагін, що проходить в своєму розвитку ряд фенологічних фаз. Рослини злаків складені системою різнотипних пагонів, що розрізняються за своєю будовою, тривалості життя, тривалості фаз розвитку тощо[4].

І. Козій і Й. М. Берко запропонували позовний аналіз метамерної будови генеративного пагона. В основу цього методу автори поклали основні положення морфології рослин: поздовжню симетрію, метамерну будову пагона та його структурно-функціональну зональність. Але найбільш значущі результати в цій області знань отримані в дослідках з пшеницею.

Овес – рослина помірного клімату. На території нашої країни основні площі його посівів

зосереджені в не чорноземній зоні, лісовій та лісостеповій зонах України. Однак нинішні погодні умови, зокрема посуха, що супроводжується високою температурою і сонячною інсоляцією, є одним з основних факторів, що лімітують вирощування вівса в умовах цих зон України.

Останнім часом спостерігається тенденція скорочення посівних площ вівса в Україні. За останні роки вони зменшилися з 442 до 241 тис. га. (практично у 2 рази) Основні площі вівса зосереджені в Поліссі (56,1 %) та Лісостепу (28,2 %), які є більш сприятливими для вирощування цієї культури. Але і тут іде поступове скорочення площ під посівами вівса, що призводить до зменшення його виробництва.

Досліди проводилися у 2013, 2014 та 2018 роках на спостережних ділянках метеорологічної навчально-наукової лабораторії ОДЕКУ в с.Чорноморка. Умови Одеської області є не досить сприятливими для вирощування вівса у зв'язку з недостатністю зволоження та високим температурним фоном.

Погодно-кліматичні умови Степової зони характеризуються циклічною мінливістю клімату і в останні роки супроводжуються потеплінням холодного періоду і зростанням тривалості посушливих періодів протягом весняно-літньої вегетації. Найчастіше спостерігається атмосферна посуха, яка характеризується низькою відотною вологістю повітря і зазвичай в тій чи іншій мірі супроводжується ґрунтовою посухою. В основному значної шкоди посуха завдає в період активного формування генеративних органів, негативно впливає на зернову продуктивність рослин.

Метеорологічні умови у роки дослідів різнились між собою. У 2013 р. на протязі вегетаційного періоду розвитку вівса в цілому спостерігалися сприятливі умови вирощування. Запаси продуктивної вологи були оптимальними для отримання максимальної продуктивності посіву. Особливістю погодних умов розвитку вівса у цьому році було те, що у період максимального накопичення біомаси випадала значна кількість опадів, що обумовило значний приріст сухої біомаси рослин.

У 2014 р. кількість опадів за весь період була більш рівномірно розподілена та запаси продуктивної вологи у метровому шарі ґрунту в середньому за період розвитку вівса були на 20 мм вище, ніж у 2013 р. Метеорологічні умови 2018 року характеризувалися відсутністю опадів та оптимальних запасів продуктивної вологи.

Отож, 2013 та 2014 рр. були найбільш сприятливими за зволоженням та опадами, в той час

як 2018 рік виявився дуже посушливим. Це дозволило вести спостереження за ростом та морфогенезом рослини вівса в контрастних умовах.

Об'єктом дослідження стали пагони злакових культурних рослин – вівса посівного *Avena Sativa* (сорт Нептун). Овес відноситься до групи культур довгого світлового дня і для свого розвитку потребує тривалого освітлення.

За рослинами вівса проводилися морфометричні спостереження, а саме визначалися довжина і вага міжвузля, лінійні параметри листових пластинок та піхв, загальна довжина пагона, загальна кількість метамерів, тривалість росту міжвузля та їх співвідношення між собою. У процесі вивчення часової організації морфогенезу у досліджуванні роки щоденно від посіву до молочної стиглості відбиралися 30 середньовікових пагонів з кожного терміну сівби та об'єднувалися в групу, з якої потім методом випадкової вибірки відбиралися 30 рослин.

Морфометричні заміри кожного пагону у вибірці проводили за допомогою штангенциркуля в поздовжньому напрямку, від основи до верхівки, з урахуванням його структурно – функціональної зональності. Заміри проводилися з точністю до 1 мм довжини листових пластинок, піхв та міжвузля усіх метамерів головного пагону. Для більш детального порівняння головних пагонів вівса у роки експерименту, пагони рослини були висушені та зважені. Крім того, визначалася вага 1 см кожної частини головного пагону.

Момент утворення чергових метамерів фіксувався за допомогою бінокулярної лупи БМС-9. За початок росту тієї чи іншої частини метамера приймали момент, коли її добовий приріст в довжину складав не менш ніж 1 мм.

Ріст рослин – незворотне збільшення розмірів і маси, викликане новоутворенням елементів їх структури. Швидкість росту рослини залежить, перш за все, від структури і функціональної активності листя, розмірів листового покриву і розподілу біомаси по органам.

Визначення абсолютної швидкості росту міжвузля пагону проводилися за формулою

$$C = L_2 - L_1 / t_2 - t_1, \quad (1)$$

відносної – за формулою

$$V = \{L_2 - L_1 / L_1(t_2 - t_1)\} * 100\%, \quad (2)$$

де  $L_1$  і  $L_2$  – довжина міжвузля у моменти часу  $t_1$  і  $t_2$  [5]. Статистичну обробку результатів дослідів проводили по Б. О. Доспехову [6].

Також була визначена максимальна швид-

кість росту кожного метамеру в лінійній фазі [5]

$$C_m = W_{\max} \left[ \frac{2t_e - t_m}{t_e(t_e - t_m)} \right]^{t_m / (t_e - t_m)}, \quad (3)$$

де  $C_m$  – максимальна швидкість росту в момент часу  $t_m$ , а  $t_e$  – швидкість, коли ріст зупиняється, тобто коли досягається максимальна маса  $W_{\max}$ .

### 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідні роки ми розглядали ріст 8 метамерів стебла вівса – підземний, сім надземних та восьмий – волоть. Експериментальні дані показали, що на окремих етапах розвитку темпи росту різняться. Тривалість росту одних органів завжди визначається тривалістю формування та росту інших органів.

У початковий період темпи росту низькі. Потім інтенсивність росту посилюється і йде з великою швидкістю (період великого росту), а потім знову сповільнюється. При цьому можна побачити, що спочатку швидкість росту зростає, потім деякий час зберігається на постійному рівні, а потім спадає. Таке спадання зазвичай збігається з переходом до репродукції.

Аналіз залежності абсолютної швидкості росту вівса від температури повітря показав, що абсолютна швидкість росту збільшується від нижнього міжвузля до верхнього. Так, при температурі від 15°C до 20°C абсолютна швидкість росту вівса була незначна та зростала від 0,01 до 0,5 мм/добу. Але, коли температура повітря досягає відмітки 20°C, абсолютна швидкість росту починає швидко зростати від 0,5 мм/добу до майже 2 мм/добу (рис. 1).

На рис. 2 представлена максимальна швидкість росту в лінійній фазі кожного метамеру у середньому за досліджувані роки (2013, 2014, 2018 рр.), яка визначена за моделлю [7]. З рисунку видно, що максимальна швидкість зростає, починаючи з 1 по 6 метамер, а потім на 7 метамері різко спадає, що вказує на початок та завершення етапу формування зерна. Ця модель [5] відтворює архітектуру рослини та морфологію вівса від сходів до повної стиглості.

Також в роботі були розраховані суми ефективних температур, при яких відбувається початок та кінець росту кожного міжвузля за 2013, 2014 та 2018 роки. На рисунку 3 наведено ріст міжвузля пагону вівса у 2014 році. З рисунку видно, що перше міжвузля починає свій ріст при

накопиченні ефективної температури до 117°C, тоді як для початку росту волоті необхідно накопичення суми ефективних температур до 668 °С. При накопиченні суми ефективних температур до 1173 °С одночасно зупиняється ріст сьомого міжвузля та волоті рослини.

Ріст пагону характеризується подовженням та потовщенням міжвузля. Подовження починається від верхнього та нижнього вузлів та йде на зустріч один одному з однаковою швидкістю. Разом з подовженням першого міжвузля подовжується друге міжвузля, однак енергійне подовження другого міжвузля відбувається в наступні 5 днів після припинення росту першого. Аналогічно протікає подовження третього та четвертого міжвузля. Під час енергійного подовження одного міжвузля одного метамеру, розташоване вище міжвузля росте повільно. У той час, коли міжвузля, яке розташоване нижче, майже зупиняє ріст, міжвузля, яке розташоване вище, дає найбільший приріст у довжину.

Головні пагони вівса у досліджувані роки, не залежно від висоти та тривалості росту, мали по 7 добре сформованих міжвузел та волоть.

В таблиці 1 представлені результати дослідження росту міжвузля в середньому за три роки (2013, 2014 та 2018 рр.). На ріст і розвиток рослин вівса значно впливали метеорологічні фактори (першу чергу – температура повітря та вологість ґрунту), вони визначали інтенсивність ростових процесів та накопичення вегетативної маси. Надзвичайно важливого значення для розвитку рослин набуває сума ефективних температур (вище 5 °С), яку отримують рослини за період від сівби до повної стиглості. Отже, були виявлені та розраховані у середньому за роки дослідження суми ефективних температур для початку росту міжвузля та суми ефективних тем-

ператур, необхідні від початку росту для завершення росту міжвузля вівса. Також відбувалися спостереження за тривалістю росту кожного міжвузля. З таблиці видно, що загальна тривалість росту міжвузля збільшувалась від нижніх ярусів до верхніх і склала від 9 до 30 днів (у середньому за 3 роки спостережень). Але виняток складає 8 метамер, тобто волоть, тривалість росту якої коротша на 4 доби.

Параметри морфологічних структур в момент виявлення росту міжвузля дещо різнилися між собою в залежності від року вегетації. В таблиці 2 представлені результати дослідження росту вівса у сприятливому 2014 році. Як бачимо, довжина першого надземного міжвузля незначна і складає 1,7 см. Але довжина міжвузля повільно зростає від нижніх до верхніх ярусів. Так, 7 міжвузля має 46,8 см в довжину, а волоть - 25,1 см у середньому за роки дослідження. Для більш детального вивчення пагону вівса у роки експерименту, міжвузля вівса були висушені та зважені.

На рисунку 4 представлена частка кожного міжвузля в загальній довжині стебла у середньому за роки дослідження у відсотках. Як видно з рисунку, найбільшу довжину має 7 міжвузля, тобто міжвузля, яке розташоване під волоттю. Саме його висота є показником забезпеченості рослини водою в період цвітіння, формування та наливу зерна, і саме це міжвузля найбільш реагує на несприятливі умови.

Але слід відмітити, що закономірності формування пагону вівса не змінюються в залежності від метеорологічних умов - несприятливі умови вирощування впливають на всі частини пагону: скорочується стебло (45 %), пластинка (10 %) та піхва (20 %).

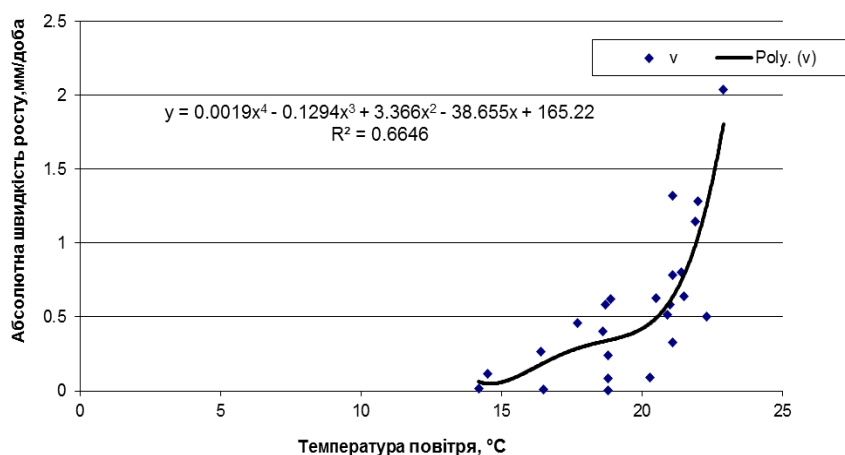


Рис. 1 - Залежність абсолютної швидкості росту міжвузля від температури повітря

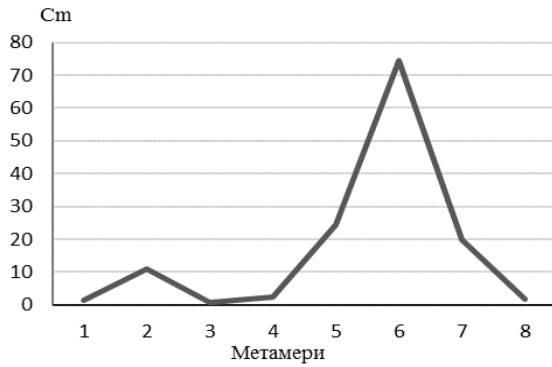


Рис. 2 - Максимальна швидкість росту в лінійній фазі кожного метамеру у середньому за досліджувані роки

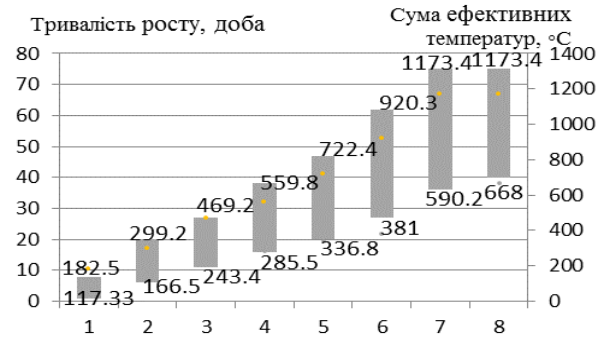


Рис. 3 - Динаміка росту міжвузля пагону вівса у 2014 році

Таблиця 1 - Ріст міжвузля в середньому за три роки (2013, 2014 та 2018 роки)

| Номер міжвузля | $\Sigma T$ ефективна, необхідна для початку росту міжвузля, °C | $\Sigma T$ ефективна від початку росту міжвузля, яка необхідна для завершення його росту, °C | Середня тривалість росту міжвузля, доба |
|----------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1              | 115                                                            | 100                                                                                          | 9                                       |
| 2              | 160                                                            | 170                                                                                          | 14                                      |
| 3              | 275                                                            | 170                                                                                          | 14                                      |
| 4              | 325                                                            | 218                                                                                          | 16                                      |
| 5              | 370                                                            | 345                                                                                          | 23                                      |
| 6              | 435                                                            | 470                                                                                          | 30                                      |
| 7              | 615                                                            | 510                                                                                          | 30                                      |
| 8              | 690                                                            | 435                                                                                          | 26                                      |

Таблиця 2 – Ріст міжвузля пагону вівса у 2014 році

| Номер міжвузля | $\Sigma T$ ефективна, початок росту | $\Sigma T$ ефективна, кінець росту | Довжина, см | Частка, % | Маса, г | Частка, % |
|----------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------|-----------|---------|-----------|
| 1              | 117                                 | 183                                | 0,17        | 0,13      | 0,002   | 0,12      |
| 2              | 167                                 | 299                                | 1,8         | 1,39      | 0,023   | 1,37      |
| 3              | 243                                 | 469                                | 4,7         | 3,6       | 0,06    | 3,57      |
| 4              | 286                                 | 560                                | 10,4        | 8         | 0,13    | 7,7       |
| 5              | 337                                 | 722                                | 15,5        | 11,96     | 0,2     | 11,9      |
| 6              | 381                                 | 920                                | 25,3        | 19,5      | 0,33    | 19,6      |
| 7              | 590                                 | 117                                | 46,8        | 36,1      | 0,61    | 36,3      |
| 8              | 668                                 | 117                                | 25,1        | 19,4      | 0,33    | 19,6      |

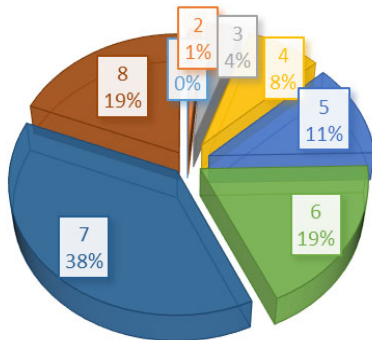


Рис. 4 - Частка кожного міжвузля в загальній довжині стебла у середньому за роки дослідження

#### 4. ВИСНОВКИ

Ріст рослин – процес диференціювання організму за рахунок утворення нових та збільшення старих елементів його структури. [8].

Вивчення часових закономірностей росту та розвитку наземних вегетативних органів вівса показало, що продуктивність всієї рослини значною мірою визначається довжиною волоті та кожного метамеру окремо, а також залежить від метеорологічних умов вегетаційного періоду.

Міжвузля стебла вівса різняться за триваліс-

тю, відносною та абсолютною швидкістю росту. Тривалість росту міжвузля стебла вівса у середньому за досліджувані роки складає від 9 діб для першого міжвузля до 30 діб – для сьомого, та для волоті – 26 діб.

Встановлено суми ефективних температур для початку росту кожного міжвузля та суми ефективних температур, необхідні від початку росту до завершення росту міжвузля вівса.

Максимальні значення абсолютної швидкості росту збільшуються від нижніх метамерів до верхніх - від 0,01 мм/добу до 1,5 мм/добу у середньому за період дослідження

Максимальні значення відносної швидкості росту міжвузля характерні для кожного метамера та досягають від 20 % до 380 % у середньому за досліджувані роки.

Як показали дослідження, частка довжини кожного з міжвузлів від загальної довжини стебла варіює від 1 до 38% (7-ме міжвузля).

Встановлені закономірності росту метамерів дозволяють урахувати усі фактори, які впливають на отримання більш високих та стійких врожаїв цієї культури в умовах Одеської області та надати практичні рекомендації щодо встановлення оптимальних та лімітуючих факторів навколишнього середовища.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лазаревич С. В. Мыхлык С. В. Влияние строения на хозяйственно полезные признаки овса посевного. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2015. №1. С. 44–49.
2. Шафранова Л. М. О метамерности и метамерах у растений. *Журнал общей биологии*. 1980. Т. 41, №3. С. 437–447.
3. Серебрякова Т. И. Морфогенез побегов и эволюция жизненных форм злаков. Москва : Наука, 1971. 360 с.
4. Белюченко И. С. Происхождение и эволюция злаков и методы изучения их биоморфологии. *Научный журнал КубГАУ*. 2014. №96(2). С. 1–19.

5. Williams R. F. The shoot apex and leaf growth : a study in quantitative biology. London; New-York: Camb. Univ. Press, 1975. 256 p.
6. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. Москва : Агропромиздат, 1985. 352 с.
7. Yin X. et al. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany*. 2003. 91. Pp. 361–371.
8. Шевелуха В. С. Периодичность роста сельскохозяйственных растений и пути её регулирования. Москва : Колос, 1980. 455 с

## REFERENCES

1. Lazarevich, S.V. & Mykhlyk, S.V. (2015). Vliyanie stroeniya na khozyaystvenno poleznye priznaki ovsa posevnogo [The influence of the structure on economically useful signs of sowing oats]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy]*, 1, pp. 44–49. (in Russ.)
2. Shafranov, L.M. (1980). O metamernosti i metamerakh u rasteniy [About metamerism and metamerism in plants]. *Zhurnal obshchey biologii [Journal of General Biology]*, 41(3), pp. 437–447. (in Russ.)
3. Serebryakova, T.I. (1992). *Morfogenez pobegov i evolyutsiya zhiznennykh form zlakov [Morphogenesis of shoots and the evolution of life forms of cereals]*. Moscow: Nauka. (in Russ.)
4. Belyuchenko, I.S. (2014). Proiskhozhdenie i evolyutsiya zlakov i metody izucheniya ikh biomorfologii [The origin and evolution of cereals and methods for studying their biomorphology]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU [Scientific journal KubSAU]*, 96(2), pp. 1–19. (in Russ.)
5. Williams, R.F. (1975). *The Shoot Apex and Leaf Growth: A Study in Quantitative Biology*. London; N.Y.: Camb. Univ. Press.
6. Dospekhov, B.A. (1985). *Metodika polevogo opyta [Field Experience Methodology]*. Moscow: Agropromizdat. (in Russ.)
7. Yin, X. et al. (2003). A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany*, 91, pp. 361–371.
8. Shevelukha, B.C. (1992). *Periodichnost' rosta sel'skokhozyaystvennykh rasteniy i puti ee regulirovaniya [Plant growth frequency of agricultural plants and regulation regulation]*. Moscow: Kolos. (in Russ.)

## MORPHOLOGICAL FEATURES OF OAT (*AVENA SATIVA L.*) SHOOTS FORMATION IN THE SOUTHERN PART OF UKRAINE

A. A. Ilin

Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, [ilina\\_ann@ukr.net](mailto:ilina_ann@ukr.net)

Oats is essential for agricultural production and processing industry due to the unique biochemical composition of its grain. Thus, it is very important to study the biological and morphometric features of oats. The length and area of the plant's organs can establish a degree of comfort of growing conditions and determine during which period of plant's life the external weather conditions changed. Phytomers are basic repetitive functional units of the oat shoot. This paper presents the description and parameters of development of oat shoot metamers, namely, the identification of growth patterns of terrestrial vegetative metamers of oat shoots and their parts. The experiments were conducted in 2013, 2014 and 2018. The weather conditions of the specified

years varied greatly – 2013 and 2014 were the most favorable in terms of humidification and precipitation, while 2018 was a very dry one. The paper determines the absolute and relative growth rates of the oat shoot internode paper and the maximum growth rate of each metamer in the linear phase. According to our observations, the absolute growth rate of oats was negligible and increased from 0.01 to 0.5 mm/d when the air temperature varied from 15 °C to 20 °C. However, when the air temperature reached about 20 °C, the absolute growth rate increased from 0.5 mm/d to almost 2 mm/d. We also found the effective sum temperatures under which the beginning and the end of the growth of each internodes take place. Thus, the first internode starts to grow the effective temperature sum of up to 117 °C is with the accumulated while the panicle starts growing when the effective temperature sum of up to 668 °C is accumulated. The growth of both the seventh internode and the panicle stops at the same time when the effective temperature sum of up to 1173 °C is accumulated. The ontogeny of oat shoots has a regular sequence of growth and development of terrestrial vegetative shoot metamers and their parts. The average growth duration of oat stem internode during the years of research constituted 9 days for the first internode, 30 days for the seventh internode and 26 days for the panicle .

**Keywords:** metamer, internode, leaf plate, leaf sheath, shoot, development, oats.

## МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОБЕГА ОВСА ПОСЕВНОГО (AVENA SATIVA L.) В УСЛОВИЯХ ЮГА УКРАИНЫ

А. А. Ильина

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

Овес имеет большое значение для сельскохозяйственного производства и перерабатывающей промышленности благодаря уникальному биохимическому составу зерна. Поэтому очень важным является вопрос изучения биологических и морфометрических особенностей овса. Длина и площадь органов растения позволяют установить степень комфортности условий выращивания и проследить, в какой именно период жизни растения происходили изменения внешних погодных условий. Метомер является базовым повторительным структурно-функциональным блоком побега овса. В данной работе представлено описание и параметры развития метамеров побега овса, а именно, выявлены закономерности временной организации последовательного роста наземных вегетативных метамеров овса и их частей. Опыты проводились в 2013, 2014 и 2018 годах, погодные условия которых значительно отличались между собой - 2013 и 2014 гг. были наиболее благоприятными по увлажнению и осадкам, в то время как 2018 оказался очень засушливым. В работе были определены абсолютная и относительная скорости роста междоузлия овса, а также максимальная скорость роста каждого метамера в линейной фазе. По нашим наблюдениям абсолютная скорость роста овса была незначительная при температуре от 15 °C до 20 °C и увеличивалась от 0,01 до 0,5 мм / сутки. Однако, когда температура воздуха достигает отметки 20 °C, абсолютная скорость роста возрастала от 0,5 мм / сутки до почти 2 мм / сутки. Также были установлены суммы эффективных температур, при которых происходит начало и конец роста каждого междоузлия. Так, первое междоузлие начинает свой рост при накоплении суммы эффективных температур до 117 °C, для начала роста метелки необходимо накопление суммы эффективных температур до 668 °C, а при накоплении суммы эффективных температур до 1173 °C останавливается одновременно рост седьмого междоузлия и метелки растения. В онтогенезе стебля овса наблюдается закономерная последовательность роста и развития наземных вегетативных метамеров овса и их частей. Продолжительность роста междоузлий овса в среднем за исследуемые годы составляет от 9 суток для первого междоузлия до 30 суток для седьмого, и для метелки - 26 суток.

**Ключевые слова:** метамер, междоузлия, листовая пластина, листовое влагалище, побег, развитие, овес.

*Подання до редакції: 18. 05. 2019  
Надходження остаточної версії: 06. 03. 2020  
Публікація статті : 03. 07. 2020*

УДК 556.531

## ВИЗНАЧЕННЯ АНТРОПОГЕННИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ В БАСЕЙНІ Р. КРИВИЙ ТОРЕЦЬ (ЗА ПРОГРАМОЮ ПІДТРИМКИ ЄС ВОДНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ)

Н. С. Лобода, І. В. Катинська

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [natalie.loboda@gmail.com](mailto:natalie.loboda@gmail.com),  
<https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>  
<https://orcid.org/0000-0001-9152-0471>

Актуальність роботи полягає в необхідності реалізації розрахункових методів, запропонованих Водною Рамковою Директивою, спрямованих на оцінки антропогенних навантажень та установлення ризиків недосягнення екологічних цілей для різних водних об'єктів. Об'єктом досліджень є річка Кривий Торець, яка відноситься до однієї з найбільш забруднених річок України. Предметом досліджень є показники антропогенного навантаження на стан поверхневих вод річки та визначення ризиків недосягнення доброго екологічного статусу басейну.

Метою роботи є визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод МПВ р. Кривий Торець – м. Дружківка та оцінка ризику невиконання екологічних цілей. Для цього були використані дані гідрохімічних спостережень до 2018 року включно, що порівнювалися з встановленими пороговими значеннями показника антропогенного навантаження. Наказом Міністерства екології та природних ресурсів України № 4 від 14 січня 2019 року, пункт моніторингу р. Кривий Торець – м. Дружківка відноситься до «істотно зміненого» масиву поверхневих вод. Відповідно до проведення гідроморфологічного моніторингу в РБР (район басейну річки) Дон та оцінки гідроморфологічних показників в рамках проекту Координатора проектів ОБСЄ в Україні “Допомога в розширенні системи моніторингу довкілля на Донбасі”, в роботі було встановлено, що МВР р. Кривий Торець віднесено до “істотно зміненого” через масштабні спрямлення русла. У запропонованій роботі згідно із «Методичні рекомендації щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод» були зроблені оцінки антропогенних навантажень від точкових джерел (скиди стічних вод) та з дифузних джерел (рослинництво та тваринництво). Установлено, що за внеском об'єму стічних вод у річний стік р. Кривий Торець не підлягає екологічному ризику. За обсягом надходження стічних вод (індикатор  $P_{CB}$ ) від точкових джерел та за впливом рослинництва (індикатор  $I_{CB}$ ) і тваринництва (індикатор  $I_{TB}$ ) виявлено існування ризику недосягнення доброго екологічного статусу. За хімічними та фізико-хімічними показниками перевищення граничних значень встановлене для амонію. Визначення зон екологічного ризику та процентилей виконано із використанням інтегральних кривих розподілу гідрохімічних показників у створі р. Кривий Торець – м. Дружківка. Найбільші значення показників антропогенного навантаження відповідають скиду стічних вод (точкові джерела забруднення) та тваринництву (дифузні джерела забруднення).

**Ключові слова:** річка Кривий Торець, масив поверхневих вод (МПВ), показники антропогенних навантажень, ризик недосягнення екологічних цілей.

### 1. ВСТУП

Згідно Водної Рамкової Директиви (ВРД) ЄС (ВРД ЄС 2000/60/ЄС, 2000; Directive 2000/60/EC, 2000) для кожного з основних річкових басейнів України має бути розроблений план управління, метою якого є досягнення у встановлені строки екологічних цілей – “доброго” екологічного стану масивів поверхневих та підземних вод, а та-

кож “доброго” екологічного потенціалу штучних або істотно змінених масивів поверхневих вод [1, 2]. Згідно з Водним кодексом України масив поверхневих вод (МПВ) є водним об'єктом (річка, озеро та інше) або його частиною. Кожний МПВ підлягає моніторингу. Відповідно до Методики визначення масивів поверхневих та підземних вод, затвердженої

Наказом Міністерства екології та природних ресурсів України № 4 від 14 січня 2019 року [3] пункт моніторингу р. Кривий Торець відноситься до «істотно зміненого» масиву поверхневих вод (код МВП – UA\_M6.5.1\_0267, тип МВП – UA\_R\_16\_L\_1\_Si (велика річка на низовині в силікатних породах)).

З метою впровадження задач співробітництва ЄС та України в сфері охорони природного навколишнього середовища й у відповідності до пункту 2 частини другої статті 132 Водного кодексу України, пункту 6 постанови Кабінету Міністрів України від 18 травня 2017 р. № 336 були розроблені «Методичні рекомендації щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод». Ці методичні рекомендації були схвалені науково-технічною радою Держводагенства у 2018 році [4]. Критерієм оцінки основних антропогенних навантажень на стан поверхневих вод або масивів поверхневих вод (МПВ) є визначення ризику недосягнення екологічних цілей. В залежності від якісних або кількісних показників антропогенних навантажень виділено 3 категорії наслідків антропогенного впливу: «без ризику»; «можливо під ризиком»; «під ризиком». Результати оцінки основних антропогенних навантажень та їхніх впливів є основою для розроблення та виконання програми заходів для досягнення екологічних цілей [4].

Актуальність роботи полягає в необхідності реалізації розрахункових методів, запропонованих Водною Рамковою Директивою, спрямованих на оцінки антропогенних навантажень та установлення ризиків недосягнення екологічних цілей для різних водних об'єктів [1, 2, 5]. *Об'єктом* досліджень є екологічний стан поверхневих вод річки Кривий Торець. *Предметом* дослідження є визначення ризиків недосягнення доброго екологічного статусу басейну на основі показників антропогенних навантажень.

*Метою роботи* є визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод МПВ р. Кривий Торець – м. Дружківка та оцінка ризику невиконання екологічних цілей на базі даних гідрохімічних спостережень з 1990 по 2018 рік включно.

Річка Кривий Торець є правою притокою річки Казенний Торець басейну Сіверського Дінця. Довжина річки 88 км. Річний стік дорівнює 69,5 млн.м<sup>3</sup>. Площа басейну – 1590 км<sup>2</sup>. Річка протікає по Донецькій області від Горлівки до Дружківки (де відбувається злиття річок Кривий Торець і Казенний Торець у м. Дружківка). Біля ландшафтного парку Клебан-Бик в Кривий

Торець впадають річки Клебан-Бик і Бичок. Течія р. Кривий Торець дуже сильна. В окремих місцях є кам'яністі перекати. Біля річки розташовані міста: Торецьк (правий берег), Дружківка (біля злиття річок Кривий Торець і Казенний Торець, є автодорожній міст через річку Кривий Торець), Макіївка, Горлівка, Костянтинівка, Ясинувата (в верхів'ях річок Кальміус і Кривий Торець) [6].

За даними гідрохімічного моніторингу ДСНС України річка Кривий Торець є найбільш забрудненою річкою суббасейну річки Казенний Торець і знаходиться під впливом високого техногенного навантаження. Води річки Кривий Торець сильно забруднені господарсько-побутовими, промисловими, стічними і шахтними водами. Наявність значних об'ємів скидів обумовлює неприпустимо високий вміст у водах річки органічних, а в багатьох випадках і токсичних речовин. Основними забруднювальними речовинами є сульфати та біогенні речовини (сполуки азоту та фосфору), а також важкі метали. Кількість підприємств, що скидають брудні води не зменшується, що вказує на слабку ефективність роботи очисних споруд цих підприємств [7]. У роботі [8] було показано, що у найближчі роки у створі р. Кривий Торець – м. Дружківка очікується перевищення критерію забруднення сполуками нітратів [5]. Також необхідно враховувати, що в басейні р. Кривий Торець основні потенційно небезпечні об'єкти розташовані на непідконтрольній території, на межі контактної лінії або в так званій «сірій зоні», й унаслідок призупинення / припинення господарської діяльності або інших формажорних обставин можуть чинити істотний вплив на стан вод басейну Сіверського Дінця [9].

Дослідження екологічного стану річок басейну Сіверського Дінця проводилися вченими Київського національного університету імені Тараса Шевченка [14], Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України [10, 11], Українського науково-дослідного інституту екологічних проблем, Науково-дослідного інституту екологічної безпеки і управління Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління, Навчально-наукового інституту «Інститут геології», Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова [12, 13].

В Одеському державному екологічному університеті результати дослідження водності та сучасного екологічного стану річок басейну Сіверського Дінця представлені у роботах [5, 15], де були виявлені основні тенденції змін

якості води у часі та по довжині річки Сіверський Донець та її приток на базі даних гідрохімічних спостережень, розглянутих до 2015 року. Якість води була проаналізована за інтегральними показниками якості води [16]: коефіцієнт забруднення, індекс забруднення води (ІЗВ), узагальнений індекс стану вод  $I_{CB}$  відповідно до рибогосподарських норм якості вод.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі використані дані щодо кількості та вмісту стічних вод [17], гідрохімічних та гідрологічних спостережень у моніторинговому створі р. Кривий Торець – м. Дружківка від початку спостережень до 2018 року включно.

Згідно представленої методики на першому етапі розглядаються гідроморфологічні показники антропогенного впливу: порушення безперервності потоку води та середовищ, зміна гідрологічного режиму, морфологічні зміни. Оцінка досягнення екологічних цілей для МПВ за гідроморфологічними показниками надається в залежності від наявності або відсутності гідроморфологічних змін [4, 18, 19]. Згідно проведення гідроморфологічного моніторингу в РБР (район басейну річки) Дон та оцінки гідроморфологічних показників в рамках проекту Координатора проектів ОБСЄ в Україні “Допомога в розширенні системи моніторингу довкілля на Донбасі” [4], в роботі [20] було встановлено, що МВП р. Кривий Торець віднесено до “істотно зміненого” через масштабні спрямлення русла. Також у роботі [20] за результатами гідроморфологічної оцінки МПВ р. Кривий Торець (код МВП – UA\_M6.5.1\_0267, тип МВП – UA\_R\_16\_L\_1\_Si (велика річка на низовині в силікатних породах)) відповідає третьому гідроморфологічному класу і не відповідає вимогам високого статусу. Досліджуваний МПВ знаходиться «під ризиком», існує можливість досягнення екологічних цілей.

На другому етапі розглядаються показники основних антропогенних навантажень для оцінки забруднення з точкових та дифузних джерел. Точковими джерелами забруднення є постійні місця скиду комунально-побутових та промислових вод. За наявності точкових джерел забруднення у воді переважають амонійні сполуки, які накопичуються у ґрунтах через їх сорбцію на поверхні глинистих мінералів. Дифузні джерела забруднення є розподіленими по території водозбору. Такого роду забруднен-

ня виникає через змивання забруднювальних речовин з поверхні водозбору та через ерозію. При дифузному забрудненні переважають нітратні форми сполук азоту, які є добре розчинними і легко вимиваються під час танення снігу та випадіння інтенсивних дощових опадів. Дифузні джерела забруднення мають сільськогосподарське походження. Нітратне забруднення зростає із площею орних земель. Фосфатне забруднення у більшій мірі залежить від ерозії ґрунтів (57 %) і у меншій від сільського господарства (36 %) [10].

На третьому етапі дослідження впливу антропогенних навантажень на стан поверхневих вод надаються оцінки ризику досягнення екологічних цілей за хімічними та фізико-хімічними показниками [18]. Отримані кількісні показники антропогенного навантаження порівнюються із пороговими (критичними значеннями, в залежності від яких встановлюється ступінь ризику).

Показник/індикатор антропогенного навантаження № 1 використовується для оцінки впливу точкових джерел і розраховується за формулою

$$P_{CB} = EH/Q_{min}, \quad (1)$$

де  $P_{CB}$  – обсяг скидання стічних вод у масив поверхневих вод;  $Q_{min}$  – мінімальний річний стік води в масиві поверхневих вод ( $\text{м}^3/\text{с}$ );

$EH$  – (безрозмірний) еквівалент навантаження, який ураховує скид комунальних вод і залежить від кількості населення ( $E_{\text{комунал}}$ ) та який спричиняється скиданням стічних вод промислових підприємств ( $EH_{\text{пром}}$  – органічні речовини (біологічне або хімічне споживання кисню); поживні речовини (нітроген загальний або фосфор загальний) [18]. Еквівалент навантаження ( $EH_{\text{комунал}}$ ) – є безрозмірним показником, який розраховується на підставі даних про кількість жителів, під'єднаних до каналізаційної мережі. У випадку, коли у каналізаційну мережу надходять стічні води промислових користувачів,  $EH_{\text{пром}}$  розраховується з використанням наступних коефіцієнтів:  $EH_{\text{БСК5}} = 0,06 \text{ кг/добу}$ ;  $EH_{\text{ХСК}} = 0,12 \text{ кг/добу}$ ;  $EH_{\text{Nзаг}} = 0,011 \text{ кг/добу}$ ;  $EH_{\text{Pзаг}} = 0,002 \text{ кг/добу}$ .

За показником  $P_{CB}$  установлюється ступінь існування ризику досягнення екологічних цілей (табл. 1).

Показник/індикатор антропогенного навантаження № 2 описує загальну частку стічних вод, що скидаються до масиву та дає загальну оцінку потенційного забруднення. Індикатор

№ 2 розраховується для аналізу тиску за формулою

$$I_{CB} = \Sigma Q_{CB} / MQ_r, \quad (2)$$

де  $I_{CB}$  – загальна частка стічних вод, що скидаються у масив;  $\Sigma Q_{CB}$  – загальна кількість усіх (поточних / майбутніх) скидів стічних вод у даному масиві поверхневих вод;  $MQ_r$  – середньорічна витрата води в масиві поверхневих вод.

**Таблиця 1** – Критерії оцінки ризику щодо антропогенного навантаження неочищеними стічними водами (точкові джерела забруднення)

| Категорія ризику      | Критерії                |
|-----------------------|-------------------------|
| «без ризику»          | $P_{CB} \leq 1,0$       |
| «можливо під ризиком» | $1,0 < P_{CB} \leq 1,5$ |
| «під ризиком»         | $P_{CB} > 1,5$          |

Для критеріїв ризику, пов'язаних із антропогенним навантаженням загальної частки стічних вод, використовуються три категорії ризику, які наведені в табл. 2

**Таблиця 2** – Критерії оцінки ризику щодо антропогенного навантаження загальною часткою стічних вод

| Категорія ризику      | Критерії                 |
|-----------------------|--------------------------|
| «без ризику»          | $I_{CB} \leq 0,05$       |
| «можливо під ризиком» | $0,05 < I_{CB} \leq 0,1$ |
| «під ризиком»         | $I_{CB} > 0,1$           |

Показник / індикатор антропогенного навантаження № 3 враховує антропогенне навантаження від дифузного забруднення. Під дифузними джерелами забруднення розуміють фактори сільськогосподарського забруднення: використання добрив, вирощування худоби, надмірний випас худоби. Застосування великої кількості добрив для підвищення врожаю сільськогосподарських культур має негативний вплив на якість поверхневих вод. Розрахунки показника виконуються за формулою

$$I_{CG} = S_{CG} / S_{МПВ}, \quad (3)$$

де  $I_{CG}$  – частка сільськогосподарських угідь в даному масиві;  $S_{CG}$  – площа, що використовується для інтенсивного сільського господарства у водозборі відповідного масиву;

$S_{МПВ}$  – площа водозбору відповідного масиву поверхневих вод.

Визначення категорії ризику наведене в табл. 3.

**Таблиця 3** – Критерії оцінки ризику щодо антропогенного навантаження в результаті впливу сільського господарства (дифузні джерела забруднення)

| Категорія ризику      | Критерії                |
|-----------------------|-------------------------|
| «без ризику»          | $I_{CG} \leq 0,1$       |
| «можливо під ризиком» | $0,1 < I_{CG} \leq 0,3$ |
| «під ризиком»         | $I_{CG} > 0,3$          |

Показник впливу тваринництва також характеризує дифузне забруднення поживними речовинами, які можуть впливати на біологічні показники, та органічними речовинами, що негативно впливають на кисневий режим. Цей показник розраховується за формулою

$$I_{TB} = U_{П} / S_{МПВ}, \quad (4)$$

де  $I_{TB}$  – показник для тваринницької худоби, поголів'я / га або км<sup>2</sup>;

$U_{П}$  – тваринницька одиниця (кількість поголів'я);

$S_{МПВ}$  – площа водозбору відповідного масиву поверхневих вод, га або км<sup>2</sup>.

Для критеріїв ризику, пов'язаних з антропогенним навантаженням (тваринництвом), також використовуються три категорії ризику, які наведені в табл. 4.

**Таблиця 4** – Критерії оцінки ризику щодо антропогенного навантаження в результаті впливу тваринництва

| Категорія ризику      | Критерії                 |
|-----------------------|--------------------------|
| «без ризику»          | $0 \leq I_{TB} \leq 0,3$ |
| «можливо під ризиком» | $0,3 < I_{TB} \leq 1,0$  |
| «під ризиком»         | $I_{TB} > 1,0$           |

Критерії оцінки ризику щодо антропогенного навантаження для хімічних та фізико-хімічних показників визначаються за двома категоріями ризику: «під ризиком» та «без ризику». Порогові значення хімічних та фізико-хімічних показників наведені в табл. 5. Перевищення порогових значень показників / індикаторів показує, що розглядуваний масив поверхневих вод підпадає під ризик недосагнення екологічних цілей (для розчиненого кисню – навпаки).

Процентиль є ймовірністю того, що випадкова величина  $X$  буде менше заданого  $x$ , що записується у виді  $p(X < x)$ . Процентиль  $P$  пов'язана із забезпеченістю випадкової величини  $P(x)$  таким чином:  $P = 1 - P(x)$ .

Таблиця 5 – Критерії ризику для хімічних та фізико-хімічних показників

| Річки   | Оксиген*<br>(%насичення) | БСК5**<br>мг/дм <sup>3</sup> | NH <sub>4</sub> **<br>мг/дм <sup>3</sup> | NH <sub>4</sub> ***<br>мг/дм <sup>3</sup> | PO <sub>4</sub> ***<br>мг/дм <sup>3</sup> | pH<br>мг/дм <sup>3</sup> |
|---------|--------------------------|------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| Малі    | 75                       | 5                            | 0,4                                      | 0,15                                      | 0,2                                       | 6,5-8,5                  |
| Середні | 70                       | 6                            | 0,6                                      | 0,2                                       | 0,3                                       |                          |
| Великі  | 60                       | 7                            | 0,8                                      | 0,3                                       | 0,4                                       |                          |

Примітка: \*10% процентиль – всі сезони, порівняльні умови вимірювання, щонайменше 12 вимірювань; \*\*90% процентиль – всі сезони, репрезентативні умови, щонайменше 12 вимірювань; \*\*\* - середньорічне значення.

### 3. ОПИС І АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Ступінь забруднення води р. Кривий Торець визначалася за перевищенням концентрації хімічної речовини її гранично-допустимої норми (ГДК рибогосподарської). За період спостереження з 1990-2014 рр у створі р. Кривий Торець – м. Дружківка, було виявлено, що практично всі, осереднені за 24 роки, значення гідрохімічних показників перевищують рибогосподарські нормативи (рис. 1). Так, азот нітритний – в 12 разів; мідь – в 10 разів; цинк та хром – в 7,5 разів; сульфати – в 7 разів; нафтопродукти – в 4 рази; азот амонійний, залізо загальне – в 3 рази; БСК5, магній, фосфати і феноли – в 2 рази перевищують ГДК рибогосподарського призначення. Оскільки більшість перерахованих

речовин має ефект сумарної дії, то забруднення річки у дійсності буде значно більшим. За отриманими результатами основними забруднювальними компонентами є важкі метали та азот нітритний.

Це свідчить про потрапляння в поверхневі води неочищених або недостатньо очищених стічних вод, шахтних вод (в районі населеного пункту Горлівка в р. Кривий Торець потрапляють шахтні води), що є точковими джерелами забруднення, а також забруднень пов'язаних з дифузними джерелами, основним з яких є полігон промислових відходів поблизу Костянтинівки, з якого в період випадання опадів і танення снігів забруднюючі речовини потрапляють в річку [12].

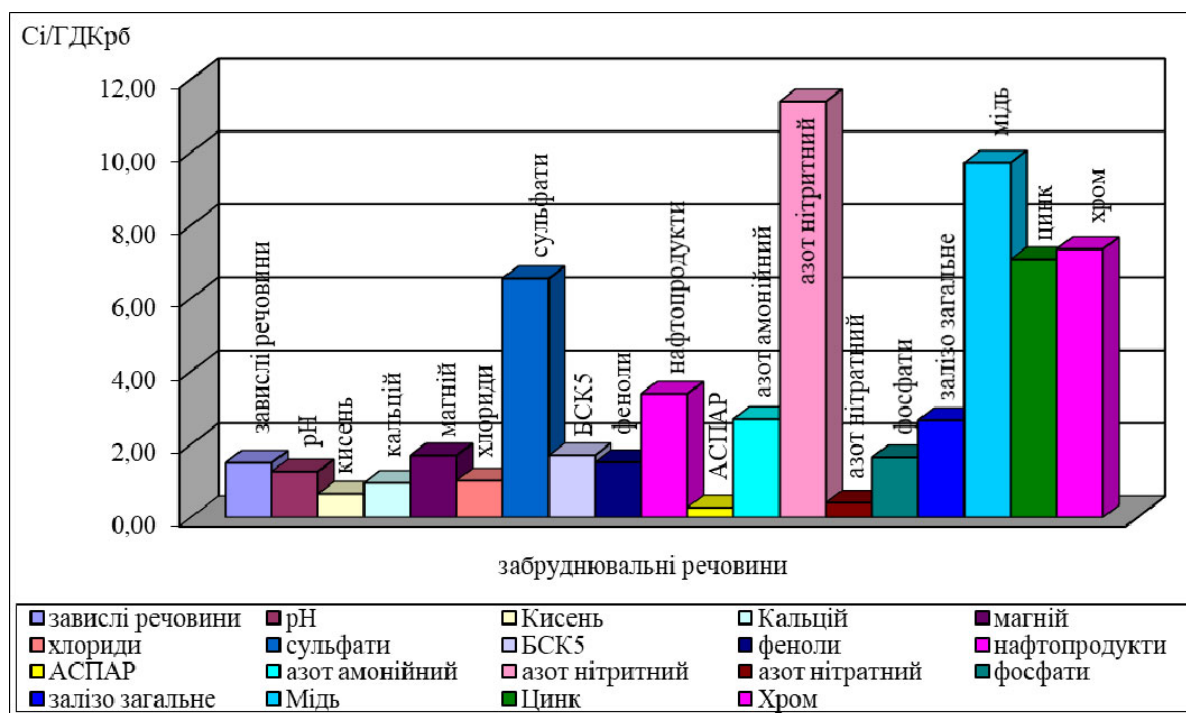
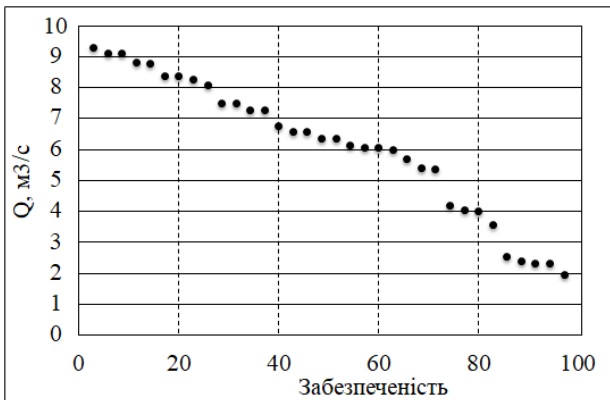


Рис. 1 – Динаміка мінливості осереднених значень гідрохімічних показників р. Кривий Торець – м. Дружківка за досліджуваний період спостережень

Антропогенні навантаження за показником впливу неочищених стічних вод розраховувалися за формулою (1). Обсяг скидання забруднюючих речовин становить 0,243 тис.тон [17]. Мінімальний річний стік для створу р. Кривий Торець – м. Дружківка визначався за емпіричною кривою забезпеченості річного стоку і становив  $2,25 \text{ м}^3/\text{с}$  (95% забезпеченість) (рис. 2).



**Рис. 2** – Крива забезпеченості середньорічних витрат води у створі р. Кривий Торець – м. Дружківка за період з 1982 по 2015 роки

Безрозмірний показник еквіваленту навантаження ( $EH_{\text{комунал}}$ ) розраховувався на підставі кількості жителів, під'єднаних до каналізаційної мережі. Відповідно до [21], середня кількість населення міста складає – 65226 осіб, з яких 11217 осіб – тимчасово переміщені особи з окупованої території України та районів проведення антитерористичної операції.

Еквівалент навантаження  $EH_{\text{пром}}$  розраховувався відповідно до кількості забруднюючих речовин, що скидаються разом зі зворотними (стічними) водами (табл. 6) з використанням відповідних коефіцієнтів.

**Таблиця 6** – Кількість забруднюючих речовин (тис. тон), що скидаються разом зі зворотними (стічними) водами у МПВ р. Кривий Торець – м. Дружківка [17]

| Показник       | Значення, тис.тон |
|----------------|-------------------|
| БСК5           | 0,029             |
| ХСК            | 0,100             |
| Азот амонійний | 0,003             |
| Нітрити        | 0,004             |
| Нітрати        | 0,107             |
| Азот загальний | 0,114             |

Місто Дружківка є багатогалузевим містом, в якому працюють понад 300 підприємств малого

та середнього бізнесу та близько семи великих промислових об'єктів [21].

Очисні споруди м. Дружківка є значними точковими джерелами широкого спектру забруднення поверхневих вод річки Кривий Торець. В існуючих економічних умовах, всі вони працюють неефективно, оскільки були збудовані 50-60 років тому і ресурс їх роботи вже вичерпаний. За результатами розрахунків (табл. 7) обсяг скидання стічних вод у масив поверхневих вод р. Кривий Торець – м. Дружківка від джерел скидів стічних вод агломерацій (населення) становить 28,99, що більше ніж в 19 разів перевищує максимальне значення критерія  $P_{CB}$ , категорія ризику – «під ризиком». Отриманий результат підтверджує правило: будь-який скид стічних вод агломерацій (поселень) більше 2 тис. мешканців ставить масив поверхневих вод «під ризик» досягнення екологічних цілей. Обсяг скидання стічних вод у масив поверхневих вод р. Кривий Торець – м. Дружківка від джерел скидів стічних неочищених вод становить 5,19, що в 3,5 рази перевищує максимальне значення критерія  $P_{CB}$ , категорія ризику – «під ризиком».

Загальна частка стічних вод у масиві поверхневих вод р. Кривий Торець – м. Дружківка була розрахована за формулою 2 для всіх підприємств розташованих у м. Дружківка (табл. 8). Вихідні дані щодо об'єму скидів стічних вод в МПВ р. Кривий Торець – м. Дружківка взяті з Державного Водного Кадастру за 2018 рік [17] і  $\Sigma Q_{CB}$  становить  $2,303 \text{ млн.м}^3$ , або  $0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ . Середня річна витрата води у пункті спостережень р. Кривий Торець – м. Дружківка була визначена на базі даних гідрологічних спостережень за період з 1982 по 2015 роки включно і становить  $6,15 \text{ м}^3/\text{с}$ , або  $193,946 \text{ млн.м}^3$ .

В результаті оцінки за показником загальна частка стічних вод ( $I_{CB}$ ) досліджуваній МПВ визначений як такий, що не знаходиться під ризиком.

На наступному етапі за формулами 3-4 були розраховані два індикатори антропогенного навантаження, яке виникає через дифузне забруднення від сільсько господарство  $I_{CG}$  та тваринництва  $I_{TV}$  (табл. 9).

$I_{CG}$  описує можливість дифузного забруднення від сільськогосподарської діяльності (застосування добрив, пестицидів та інших засобів захисту рослин). В Україні інформація щодо сільськогосподарських угідь представлена відповідно до адміністративно-територіальних одиниць, не пов'язаних з водозбірною територією водних об'єктів.

Таблиця 7 – Оцінка ризику недосягнення екологічних цілей за показником неочищені стічні води ( $P_{CB}$ )

| Показник                                                                | Значення показника | Оцінка ризику |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------|
| Еквівалент населення ( $EH_{комунал}$ )                                 | 65,23              | «під ризиком» |
| Показник неочищені стічні води ( $P_{CB}$ ) для комунальних стічних вод | 28,99              |               |
| Еквівалент стічних вод $EH_{пром}$                                      | 11,68              | «під ризиком» |
| Показник неочищені стічні води ( $P_{CB}$ ) для промисловості           | 5,19               |               |

Таблиця 8 – Оцінка ризику недосягнення екологічних цілей за показником загальна частка стічних вод ( $I_{CB}$ )

| Показник                                                               | Значення показника | Оцінка ризику |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------|
| Об'єм скидів стічних вод ( $\Sigma Q_{CB}$ ), млн.м <sup>3</sup>       | 2,303              | «без ризику»  |
| Середньорічний об'єм стоку води в річці ( $MQ_p$ ), млн.м <sup>3</sup> | 193,946            |               |
| Загальна частка стічних вод ( $I_{CB}$ )                               | 0,012              |               |

Таблиця 9 – Оцінка ризику недосягнення екологічних цілей за показником дифузне забруднення: сільське господарство ( $I_{CF}$ ) та тваринництво ( $I_{TB}$ )

| Показник                                                                       | Значення показника | Оцінка ризику |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------|
| Площа водозбору р. Кривий Торець – м. Дружківка ( $S_{МПВ}$ ), км <sup>2</sup> | 1590               | «під ризиком» |
| Територія інтенсивного с/г ( $S_{CF}$ ), км <sup>2</sup>                       | 1226               |               |
| Показник с/г частки водозбору ( $I_{CF}$ )                                     | 0,77               |               |
| Площа Донецької області, км <sup>2</sup>                                       | 26 517             | «під ризиком» |
| Кількість голів ( $U_{II}$ ), шт.                                              | 592,2 тис.         |               |
| Показник для тваринництва ( $I_{TB}$ )                                         | 22,3               |               |

Площа, що використовується для сільського господарства у водозборі р. Кривий Торець – м. Дружківка була визначена відповідно до [22]. Загальна площа Донецької області становить 26517 км<sup>2</sup>, з яких 20440 км<sup>2</sup> припадає на сільськогосподарські угіддя (77%). Ураховуючи, що площа досліджуваного водозбору ( $S_{МПВ}$ ) становить 1590 км<sup>2</sup>, то площа інтенсивного сільськогосподарського засвоєння буде становити 1226 км<sup>2</sup>. Таким чином, індикатор антропогенного навантаження  $I_{CF}$  для водозбору р. Кривий Торець – м. Дружківка прийнятий рівним 0,77. Відповідно даним у табл. 3 досліджуваний МПВ знаходиться під ризиком недосягнення екологічних цілей.

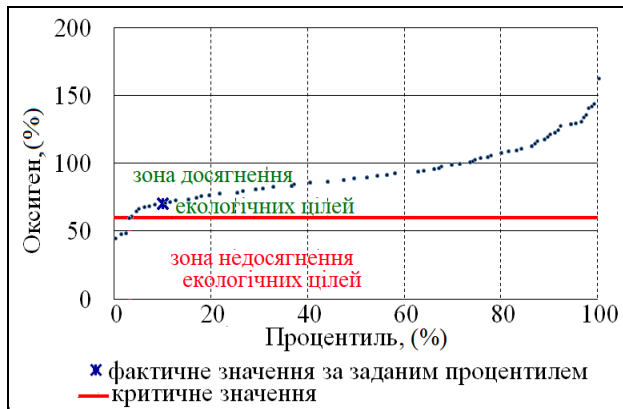
Індикатор дифузного забруднення від тваринництва ( $I_{TB}$ ), відповідно до табл. 9 становить 22,3, отже, досліджуваний МПВ знаходиться під

ризиком недосягнення екологічних цілей. Вихідні дані, щодо кількості поголів'я ( $U_{II}$ ) були взяті в статистичному довіднику за 2018 рік [23] для Донецької області. Високе значення показника тваринництва пояснюється сучасним станом Східного регіону, який має високий потенціал в галузі тваринництва, переважно за рахунок Донецької області [24]. Оцінка антропогенних навантажень за фізико-хімічними показниками була надана на основі статистичної обробки гідрохімічних даних за 1990-2018 рік (табл. 10).

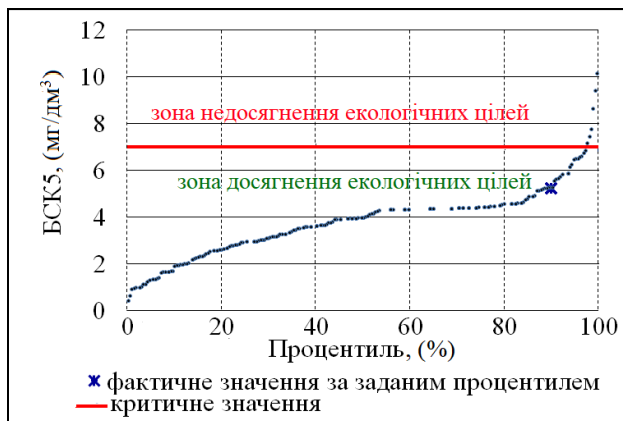
На рис. 3-5 представлені криві процентилей багаторічних гідрохімічних даних за період 1990-2018 рр, на яких виділені зони досягнення та недосягнення екологічних цілей.

**Таблиця 10** – Оцінка ризику щодо антропогенного навантаження для хімічних та фізико-хімічних показників за даними моніторингу у створі р. Кривий Торець – м. Дружківка за 1990-2018 рр.

| Показник                                                         | Фактичні значення | Критичні значення | Оцінка ризику |
|------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Оксиген, (%насичення) – 10% процентиль                           | 70                | 60                | «без ризику»  |
| БСК5, (мг/дм <sup>3</sup> ) – 90% процентиль                     | 5,22              | 7                 | «без ризику»  |
| NH <sub>4</sub> , (мг/дм <sup>3</sup> ) – 90% процентиль         | 2,33              | 0,8               | «під ризиком» |
| NH <sub>4</sub> , (мг/дм <sup>3</sup> ) – середньорічне значення | 1,2               | 0,3               | «під ризиком» |
| PO <sub>4</sub> , (мг/дм <sup>3</sup> ) – середньорічне значення | 0,38              | 0,4               | «без ризику»  |
| pH, (мг/дм <sup>3</sup> ) – середньорічне значення               | 8,21              | 6,5-8,5           | «без ризику»  |



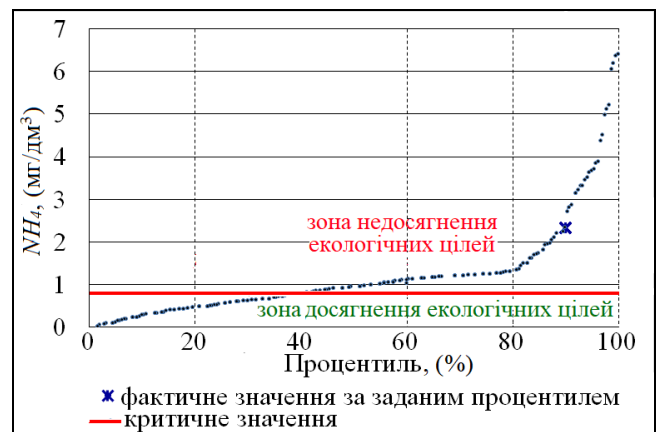
**Рис. 3** – Інтегральна крива розподілу показника оксигену та виділення зони ризику



**Рис. 4** – Інтегральна крива розподілу показника БСК5 та виділення зони ризику

Аналіз багаторічних даних за гідрохімічними показниками якості води, наведеними в табл. 10, показав, що ризик недосагнення екологічних цілей виникає по азоту амонійному. Забруднення води амонійним азотом свідчить про наявність точкових джерел неочищених комунальних стічних вод, що може бути спричинено відсутністю та неналежною роботою очисних споруд в досліджуваному МПВ. За іншими по-

казниками, наведеними в табл. 10, МПВ р. Кривий Торець – м. Дружківка не підлягає ризику антропогенного навантаження. При такому підході не враховується внесок у забруднення вод річки нафтопродуктів, фенолів, важких металів, мінералізації, вміст яких значно перевищує ГДК.



**Рис. 5** – Інтегральна крива розподілу амонію та виділення зони ризику

#### 4. ВИСНОВКИ

В результаті застосування розробки «Методичні рекомендації щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод» до МПВ р. Кривий Торець – м. Дружківка зроблені наступні висновки.

1. За гідроморфологічними показниками встановлено, що досліджуваний МПВ знаходиться «під ризиком» недосагнення екологічних цілей.

2. За часткою стічних вод у річному об'ємі стоку річки, яка визначається через показник  $I_{CB}$ , виявлено, що за цим показником встановлений ризик недосагнення екологічних цілей. екологічного ризику не існує.

3. Існування екологічного ризику виявлено за

показниками скидання неочищених комунальних (із урахуванням кількості населення) і промислових (за зазначеними коефіцієнтами скидів) вод  $P_{CB}$ .

4. За індикаторами антропогенного навантаження від дифузних джерел забруднення (рослинництва ( $I_{CF}$ ) та тваринництва ( $I_{TV}$ )) визнано, що МПВ Кривий Торець також знаходиться під ризиком недосагнення екологічних цілей.

5. Установлено, що за даними хімічних та фізико-хімічних показників ризик недосагнення екологічних цілей для МПВ р. Кривий Торець – м. Дружківка виникає через високий вміст у воді азоту амонійного.

6. На основі побудованих інтегральних кривих розподілу показників антропогенного навантаження за хімічними та фізико-хімічними показниками виділені зони ризику недосагнення екологічних цілей.

7. В цілому, за результатами розрахунків екологічних ризиків МПВ р. Кривий Торець – м. Дружківка знаходиться «під ризиком недосагнення доброго екологічного статусу».

Відзначаємо, що запропонована методика не включає до себе такі показники забруднення як органічні речовини, мінералізація, вміст важких металів, не ураховує ефект їх сумарної дії, що може призвести до хибних висновків щодо статусу МПВ, особливо в промисловорозвинутих зонах. У зв'язку із зазначеним «Методичні рекомендації щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод» мають бути доопрацьовані.

## 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 : 08.05.2020)
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // Official Journal of the European Communities. 22.12.2000. L. 327, vol. 43. 72 p.
- Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України № 4 від 14 січня 2019 року «Про затвердження Методики визначення масивів поверхневих та підземних вод». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z0287-19> (дата звернення : 08.05.2020)
- Методичні рекомендації щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод / Вихрист С., Мудра К., Осійський Е., та ін. Держводагенство, 2018. 21 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.
- Река Кривой Торец. URL: <http://kievbook.pp.ua/donecka/konka/konka5.html> (дата звернення : 08.05.2020).
- 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.
- Оцінка емісії біогенних елементів та органічних речовин у поверхневій воді басейну р. Сіверський Донець від дифузних джерел / Осадча Н. М., Ухань О. О., Чехній В. М. та ін. *Тези доповідей VII Всеукраїнської наукової конференції з міжнародною участю "Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології", присвяченої 100-річчю від дня заснування Національної академії наук України*, 13-14 листопада. Київ, 2018. С. 113-114.
- Стан басейну Сіверського Дінця та фактори впливу в умовах військових дій / Технічний звіт ОБСЄ. Україна, 2018. 88 с.
- Оцінка емісії біогенних елементів та органічних речовин у поверхневій воді басейну р. Сіверський Донець від дифузних джерел / Осадча Н. М., Ухань О. О., Чехній В. М., Голубцов О. Г. *Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології*. Київ: Ніка-центр, 2019. С. 192-199.
- Особливості формування хімічного складу поверхневих вод басейну р. Сіверський Донець / Ухань О. О., Осадчий В. І., Осадча Н. М. та ін. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2002. Вип. 25. С. 262 - 277.
- Сіверський Донець: Водний та екологічний атлас / Васенко О. Г., Гриценко А. В., Карабаш Г. О. та ін.; за ред. А. В. Гриценка, О. Г. Васенка. Харків: ВД «Райдер», 2006. 188 с.
- Сучасний екологічний стан української частини річки Сіверський Донець: експедиційні дослідження / Гриценко А. В., Васенко О. Г., Колісник А. В. та ін.; за ред. А. В. Гриценка, О. Г. Васенка. Харків: ВПП «Контраст», 2011. 340 с.
- Хільчевський В. К., Осадчий В. І., Курило С. М. *Основи гідрохімії: підручник*. Київ : Ніка-Центр, 2012. 312 с.
- Loboda, N. S., Smalii, O. V. Dynamics of quality of river water along the Siverskyi Donets river of different discharge. *Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference*, 30 September. Warsaw, Poland, 2018. Vol. 2. Pp. 12-18.
- Юрасов С. М., Сафранов Т. А., Чугай А. В. *Оцінка якості природних вод : навч. пос.* Одеса : Екологія, 2012. 168 с.
- Державний Водний Кадастр. Розділ «Водокористування». Щорічник Водокористування. 2018 рік. Басейн Дону. 2019. 97 с.
- Осійський Е., Скоблей М. *Аналіз основних антропогенних навантажень та їх вплив, проект національної методики*. Івано-Франківськ, 2018. 61 с.
- Визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод (методичні рекомендації) / О. Ярошевич, Е. Осійський, М. Скоблей та ін. Київ, 2018. 58 с.
- Гідроморфологічна оцінка масивів поверхневих вод району басейну річки Дон / Є. Василенко, О. Кошкіна, К. Мудра та ін. *Водне господарство України*. 2019. № 9-10. С. 20 - 30.
- Паспорт міста. Дружківська міська Рада. URL: <https://druisp.gov.ua/misto/pasport-mista> (дата звернення : 08.05.2020).
- Земельний довідник України 2020. База даних про земельний фонд країни / Сільськогосподарські угіддя України. URL: <https://agropolit.com/storage/2020/>

[spetsproektu/705/0006.jpg](https://spetsproektu/705/0006.jpg)

23. Статистичний щорічник України за 2018 рік / за ред. І. С. Вернера / Державна Служба Статистики України. Житомир : ТОВ «БУК-ДРУК», 2019. 482 с.
24. Ресурсний потенціал розвитку агро-промислового виробництва Східного регіону України / Кунець В.В., Камишан Н.В., Панченко О.М. та ін. Науково-технічний бюлетень ІТ НААН. 2019. №122. С. 118-130.

## REFERENCES

1. 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: 08 May 2020) (in Ukr.)
2. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities. 22.12.2000. L. 327, vol. 43.
3. Nakaz Ministerstva ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy №4 vid 14 sichnia 2019 roku «Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia masyviv poverkhnevyykh ta pidzemnykh vod». [Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine № 4 of January 14, 2019 "On approval of the Methodology for determining the massifs of surface and groundwater"]. Available at: [URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z0287-19](https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z0287-19) (Accessed: 08 May 2020) (in Ukr.)
4. Vihrist, S., Mudra, K., Osiiskii, E. et al. (2018). *Metodychni rekomendatsii shchodo vyznachennia osnovnykh antropohennykh navantazhen ta ikhnikh vplyviv na stan poverkhnevyykh vod. [Methodical recommendations for determining the main anthropogenic loads and their effects on the state of surface waters]*. State Water Agency. (in Ukr.)
5. 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.)
6. Reka Krivoy Torets [Kryvyi Torets River]. Available at: <http://kievbook.pp.ua/donecka/konka/konka5.html> (Accessed: 08 May 2020) (in Russ.)
7. 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.)
8. Osadcha, N.M., Ukhan, O.O., Chekhni, V.M. et al. (2018). [Assessment of the emission of nutrients and organic substances in the surface waters of the Siverskyi Donets River from diffuse sources]. *Tezy dopovidei 7<sup>th</sup> Vseukrainskoi naukovoï konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu "Problemy hidrolohii, hidrokhimii, hidroekolohii", prsviachenoi 100-richchiu vid dnia zasnuvannia Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy [Theses of reports of the Seventh All-Ukrainian Scientific Conference with International Participation "Problems of Hydrology, Hydrochemistry, Hydroecology" devoted to the 100th anniversary of the foundation of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, 13-14 November. Kyiv, pp. 113-114 (in Ukr.)
9. Technical Report OSCE. (2018). *Stan baseinu Siverskoho Dontsia ta faktory vplyvu v umovakh viiskovykh dii [The state of the Siversky Donets basin and factors of influence in the conditions of hostilities]*. Ukraine. (in Ukr.)
10. Osadcha, N.M., Ukhan, O.O., Chekhni, V.M. et al. (2019). [Assessment of the emission of nutrients and organic substances in the surface waters of the Siverskyi Donets River from diffuse sources]. *Problemy hidrolohii, hidrokhimii, hidroekolohii [Problems of hydrology, hydrochemistry, hydroecology]*, Kyiv: Nika-centr. pp. 192 - 199. (in Ukr.)
11. Ukhan, O.O., Osadcha N.M., Osadchii, V.I. et al. (2002). [Peculiarities of formation of chemical composition of surface waters of the Siversky Donets River basin]. *Nauk. praci UkrNDGMI [Scientific works of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute]*, 25, pp. 262-277. (in Ukr.)
12. Vasenko, O.H., Hrytsenko, A.V., Karabash, H.O. et al. (2006). *Siverskyi Donets [Siverskyi Donets River]*. Edited by A.V. Hrytsenko, O.H. Vasenko. Kharkiv: VD «Raider». (in Ukr.)
13. Hrytsenko, A.V., Vasenko, O.H., Kolisnyk, A.V. et al. (2011). *Suchasnyi ekolohichni stan ukrainskoi chastyny richky Siverskyi Donets [The modern ecological state of the Ukrainian part of the river Siverskyi Donets]*. Edited by A.V. Hrytsenko, O.H. Vasenko. Kharkiv: VPP «Kontrast». (in Ukr.)
14. 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.)
15. Loboda, N.S., & Smalii, O.V. (2018). Dynamics of quality of river water along the Siverskyi Donets river of different discharge. *Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference*, 30 September. Warsaw, Poland, vol. 2, pp. 12-18.
16. Yurasov, S.M., Safranov, T.A. & Chuhai, A.V. (2012). *Otsinka yakosti pryrodnykh vod [Assessment of the quality of natural water]*. Odesa: Ecology Publ. (in Ukr.)
17. Derzhavnyi Vodnyi Kadastr (2019). *Rozdil «Vodokorystuvannia» Shchorichnyk vodokorystuvannia. 2018 rik. Basein Donu. [State Water Cadastre Section "Water Use" Yearbook of Water Use. 2018. Don Basin]*. (in Ukr.)
18. Osiiskii, E., & Skoblei M. (2018). *Analiz osnovnykh antropohennykh navantazhen ta ikh vplyv, projekt natsionalnoi metodyky. [Analysis of the main anthropogenic loads and their impact, draft national methodology]*. Ivano-Frankivsk. (in Ukr.)
19. Yaroshevich, O., Osiiskiy, E., Skoblei, M. et al. (2018). *Vyznachennia osnovnykh antropohennykh navantazhen ta ikhnikh vplyviv na stan poverkhnevyykh vod (metodychni rekomendatsii). [Determination of the main anthropogenic loads and their influences on the state of surface waters (methodical recommendations)]*. Kyiv. (in Ukr.)
20. Vasilenko, E., Koshkina, O., Mudra, K. et al. (2019). [Hydromorphological assessment of surface water massifs of the Don River basin district]. *Vodne hospodarstvo Ukrainy [Water management of Ukraine]*, 9-10, pp. 20-30. (in Ukr.)
21. *Pasport mista. Druzhkivska miska rada [City passport. Druzhkivka City Council]*. Available at: <https://druisp.gov.ua/misto/pasport-mista> (Accessed: 08 May 2020) (in Ukr.)
22. *Zemelnyi dovidnyk Ukrainy 2020. Baza danykh pro*

- zemel'nyi fond krainy. Silskohospodarski uhiiddia Ukrainy. [Land directory of Ukraine 2020. Database of land fund of the country. Agricultural lands of Ukraine]. Available at: <https://agropolit.com/storage/2020/spetsproektu/705/0006.jpg> (Accessed: 08 May 2020) (in Ukr.)
23. Verner, I.E. (eds). (2019). *Statystychnyi shchorichnyk Ukrainy za 2018 rik. [Statistical Yearbook of Ukraine for 2018]*. Derzhavna Sluzhba Statystyky Ukrainy. Zhytomyr: «BUK-DRUK». (in Ukr.)
24. Kunects, V.V., Kamishan, N.V., Panchenko, O.M. et al. (2019). [Resource potential for the development of agro-industrial production in the Eastern region of Ukraine]. *Naukovo-tekhnichnyi biuleten IT NAAN [Scientific and technical bulletin of IT NAAS]*, 122, pp. 118-130. (in Ukr.)

## DETERMINATION OF MAIN ANTHROPOGENIC IMPACTS AND ENVIRONMENTAL RISKS FOR THE KRYVYI TORETS RIVER BASIN (BASED ON THE EU SUPPORT PROGRAM FOR UKRAINIAN WATER POLICY)

N. S. Loboda, I. V. Katynska

Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, [natalie.loboda@gmail.com](mailto:natalie.loboda@gmail.com),  
<https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>  
<https://orcid.org/0000-0001-9152-0471>

The relevance of the study consists in the need for implementation of the calculation methods proposed by the EU Water Framework Directive. The methods are aimed at assessing the anthropogenic impacts and establishing the risks of not achieving the environmental objectives for different water bodies. The object of the study is the Kryvyi Torets River, one of the most polluted rivers in Ukraine. The study focuses on the indicators of anthropogenic impact affecting the quality of the river's surface waters and the identification of the risks of not ensuring a good ecological status of its basin.

The work aims at determining the main anthropogenic impacts and their effects on the surface water status of the SWM of the Kryvyi Torets River in town of Druzhkivka and assessing the risk of failure to achieve the environmental objectives. For this purpose we used the data of hydrochemical observations up to 2018 inclusive which were compared with the established threshold values of the anthropogenic impacts. According to the Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine No. 4 as of January 14, 2019, the monitoring point of the Kryvyi Torets River – town of Druzhkivka – belongs to a "heavily modified" surface water massif. In accordance with the hydromorphological monitoring effort for the Don RBD (river basin district) and the assessment of hydromorphological indicators within the framework of the project "Assistance in expanding the environmental monitoring system in the Donbas" implemented by the OSCE Project Co-ordinator in Ukraine the research allowed establishing the fact that the SWM of the Kryvyi Torets River is referred to as "a heavily modified" due to large-scale channelization activities. Based on the "Guidelines for determining the main anthropogenic impacts and their effects on the state of surface waters" the proposed study allowed evaluation of the anthropogenic impacts from the point sources (wastewater discharges) and diffuse sources (crop production and livestock farming). It was established that there is no environmental risk resulting from the volume of wastewater inflow to the annual runoff of the Kryvyi Torets River. However, a risk of failure to ensure a good environmental status was found in relation to the volume of wastewater inflow from point sources and the influence of crop production and livestock farming. According to chemical and physico-chemical indicators, a risk of not achieving environmental objectives was determined. According to chemical and physicochemical parameters, exceeding the limit values is set for ammonium. Identification of the environmental risk zones and percentiles was performed using the integrated curves of hydrochemical indicators distribution for the section of the Kryvyi Torets River at town of Druzhkivka.

The largest values of anthropogenic impact correspond to wastewater discharge (Point Source Pollution) and livestock farming (Diffuse Source Pollution).

**Keywords:** the Kryvyi Torets River, surface water massif (SWM), indicators of anthropogenic impacts, risk of not achieving environmental objectives.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ НАГРУЗОК И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ В БАССЕЙНЕ Р. КРИВОЙ ТОРЕЦ (ПО ПРОГРАММЕ ПОДДЕРЖКИ ЕС ВОДНОЙ ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ)

Н. С. Лобода, И. В. Катинская

Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [natalie.loboda@gmail.com](mailto:natalie.loboda@gmail.com),  
<https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>  
<https://orcid.org/0000-0001-9152-0471>

Актуальность работы заключается в необходимости реализации расчетных методов, предложенной Водной Рамочной Директивой, направленных на оценку антропогенных нагрузок и определение рисков недостижения экологических целей для различных водных объектов. Объектом исследований является река Кривой Торец, которая относится к одной из наиболее загрязненных рек Украины. Предметом исследований являются показатели антропогенной нагрузки на состояние поверхностных вод реки и определение рисков недостижения хорошего экологического статуса бассейна.

Целью работы является определение основных антропогенных нагрузок и их влияния на состояние поверхностных вод МПВ р. Кривой Торец – г. Дружковка и оценка риска невыполнения экологических целей. Для этого были использованы данные гидрохимических наблюдений до 2018 года включительно, которые сравнивались с установленными пороговыми значениями показателя антропогенной нагрузки. Приказом Министерства экологии и природных ресурсов Украины № 4 от 14 января 2019 года, пункт мониторинга р. Кривой Торец – г. Дружковка относится к «существенно измененному» массиву поверхностных вод. Согласно проведенному гидроморфологическому мониторингу в РБР (район бассейна реки) Дон и оценке гидроморфологических показателей в рамках проекта Координатора проектов ОБСЕ в Украине "Помощь в расширении системы мониторинга окружающей среды на Донбассе", в работе было установлено, что МПВ р. Кривой Торец относится к "существенно измененному" из-за масштабных спрямлений русла. В данной работе в соответствии с «Методическими рекомендациями по определению основных антропогенных нагрузок и их влиянию на состояние поверхностных вод» были оценены антропогенные нагрузки от точечных источников (сбросы сточных вод) и от диффузных источников (растениеводство и животноводство). Установлено, что по объему сточных вод в речной сток р. Кривой Торец не поддается экологическому риску. По объему поступления сточных вод (индикатор  $P_{CB}$ ) от точечных источников и по влиянию растениеводства (индикатор  $I_{CB}$ ) и животноводства (индикатор  $I_{TB}$ ) выявлено существование риска недостижения хорошего экологического статуса. По химическим и физико-химическим показателями был определен риск недостижения экологических целей. По химическим и физико-химическим показателям превышение предельных значений установлено для аммония. Зоны экологического риска и процентилей определены при помощи кривых распределения гидрохимических показателей в створе р. Кривой Торец – г. Дружковка. Наибольшие значения показателей антропогенной нагрузки соответствуют сбросу сточных вод (точечные источники загрязнения) и животноводству (диффузные источники загрязнения).

**Ключевые слова:** река Кривой Торец, массив поверхностных вод (МПВ), показатели антропогенных нагрузок, риск недостижения экологических целей.

Подання до редакції : 05. 06. 2020  
Надходження остаточної версії : 15. 06. 2020  
Публікація статті : 03. 07. 2020

УДК 504.453:556.535

## ОЦІНКА ВОДНИХ РЕСУРСІВ РІЧОК УКРАЇНИ ЗА СЕРЕДНІМИ СТАТИСТИЧНИМИ МОДЕЛЯМИ ТРАЕКТОРІЙ ЗМІН КЛІМАТУ RCP4.5 ТА RCP8.5 У ПЕРІОД 2021-2050 РОКИ

Н. С. Лобода, М. О. Козлов

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

Актуальність представленої роботи обумовлена необхідністю оцінки можливого стану водних ресурсів України в ХХІ сторіччі за сценаріями змін клімату для обґрунтування стратегії економічного розвитку.

Об'єктом дослідження є водні ресурси річок України.

Предметом дослідження є наслідки впливу глобального потепління на водні ресурси України у 2021-2050 рр.

Метою роботи є оцінка впливу можливих змін клімату на водні ресурси України у ХХІ сторіччі з використанням даних траєкторій змін клімату RCP4.5, RCP8.5 у період 2021-2050 рр.

Розрахунки водних ресурсів у період 2021-2050 рр. виконані за середньою статистичною моделлю з ансамблю 14 кліматичних моделей експерименту CORDEX для траєкторій RCP4.5 та RCP8.5. Водні ресурси оцінені за моделлю «клімат-стік», розробленою в ОДЕКУ. Результатом розрахунків є оцінки ресурсів вологості і тепла, а також водних ресурсів у природних умовах їх формування. Природний (непорушений водогосподарською діяльністю) середній багаторічний річний стік, визначений за метеорологічними даними, розглядається як «кліматичний». Точність розрахунків кліматичного стоку за картою ізоліній становить  $\pm 10\%$ . Розрахунки виконані у вузлах координатної сітки. Географічне положення обраних вузлів відповідає розташуванню метеорологічних станцій, загальна кількість яких дорівнює 115.

Оцінка змін ресурсів тепла, зволоження та водних ресурсів виконувалась шляхом порівняння розрахованих величин із базовими. Базовим є кліматичний стік за період спостережень до 1989 р. Установлено, що за середньою статистичною моделлю для траєкторії RCP4.5 у період 2021-2050 рр. при порівнянні із базовим періодом очікується розширення до півночі напіваридної зони та зони недостатнього зволоження. Зона недостатнього зволоження буде просуватись до північного заходу, витискаючи зону достатнього зволоження. Зменшення водних ресурсів досягатиме мінус 40-50% на півдні країни та 0% – мінус 10% на півночі. Область зростання водних ресурсів збережеться в Українських Карпатах. Траєкторія RCP8.5 є більш «жорсткою» по відношенню до стану водних ресурсів України у порівнянні із траєкторією RCP4.5. Зменшення водних ресурсів буде відбуватися майже на всій території через зростання посушливості клімату, за виключенням Буковини. Водні ресурси зменшаться до мінус 50 – 60% на півдні країни та до мінус 30% на півночі. За обома траєкторіями RCP4.5 та RCP8.5 прогноз стану водних ресурсів є несприятливим для розвитку економіки України, оскільки буде розширюватись не тільки напіваридна зона, а й зона недостатнього зволоження, що викличе зростання дефіциту водних ресурсів в Україні.

**Ключові слова:** кліматичні сценарії, середня статистична модель, вплив змін клімату на водні ресурси, модель «клімат-стік».

### 1. ВСТУП

Україна є однією з найменш забезпечених водою країн Європи. Через її територію протікають такі дуже великі річки як Дунай, Дніпро, Сіверський Донець, але зони формуван-

ня їх стоку знаходяться поза межами України, внаслідок чого контроль за кількістю та якістю водних ресурсів обмежений. За показником водозабезпеченості Україна займає 17 місце серед 20 європейських країн (The World Bank Group, 2016). Перспективи зміни водності річок Украї-

ни внаслідок змін клімату відіграють значну роль у формуванні стратегії розвитку енергетики, транспорту, сільського господарства і комунального водогосподарства, туризму [1].

Підписання угоди щодо асоціації між Україною та Європейським Союзом поставило певні задачі в Стратегії України в секторі охорони довкілля, які регламентуються 28 директивами, серед яких важливе місце займає директива №24 “Управління водним басейном в умовах змін клімату” [2].

Актуальність представленої роботи обумовлена необхідністю оцінки можливого стану водних ресурсів України в XXI сторіччі за сценаріями регіональних змін клімату України.

Метою роботи є оцінка впливу можливих змін клімату на водні ресурси України у XXI сторіччі з використанням даних траєкторій (сценаріїв) змін клімату RCP4.5, RCP8.5 у період 2021-2050 рр.

Об’єктом дослідження є водні ресурси річок України. Слід зазначити, що водні ресурси оцінюються через запаси поверхневих та підземних вод певної території, загальною характеристикою яких слугує середня багаторічна величина річного стоку річок.

Предметом дослідження є можливі зміни водних ресурсів України у період до 2020-2050 рр.

Оцінки змін водних ресурсів виконані на базі математичної моделі “клімат-стік”, яка була розроблена в ОДЕКУ [3].

Модель “клімат-стік” використовується для визначення стану водних ресурсів за сценаріями кліматичних змін з середини 90-х років минулого сторіччя [4]. Оскільки сценарії IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) постійно удосконалюються та деталізуються, виникає необхідність в уточненні попередніх оцінок з урахуванням нових проєкцій змін клімату на території України.

Новизна представлених у роботі результатів обумовлена використанням для оцінок водних ресурсів України середньостатистичної моделі з 14 моделей змін клімату експерименту CORDEX для траєкторій RCP4.5, RCP8.5., у той час як у роботі [5] була розглянута математична модель DMI.

## 2. СТАН ПРОБЛЕМИ

Осередками досліджень можливих змін водних ресурсів України у XXI сторіччі є Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України (м. Київ), Київський національний університет імені Тараса

Шевченка, Одеський державний екологічний університет та багато інших навчальних і науково-дослідних установ України. Українські вчені проводять свої науково-дослідні роботи у рамках міжнародних кліматичних і гідрологічних проєктів, таких, наприклад, як ініціатива “Навколишнє середовище та безпека”. У число членів цієї ініціативи входять Європейська економічна комісія ООН (ЄЕК ООН), організація по безпеці і співробітництву в Європі (ОБСЄ), Програма ООН по навколишньому середовищу (ЮНЕП) та інші. На базі цих досліджень надаються оцінки змін клімату та водних ресурсів України з використанням сучасних розподілених та напів-розподілених математичних моделей провідних наукових установ Європи. На протязі 2012-2014 рр. в Одеському державному екологічному університеті (ОДЕКУ) виконувалась науково-дослідна робота, в якій об’єктом досліджень був водозбір Тилігульського лиману: проєкт 7-ої Рамкової Програми ЄС «Комплексне управління водними ресурсами і прибережною зоною в Європейських лагунах в умовах змін клімату» (FP7-ENV-2011 № 283157 “Integrated water resources and coastal zone management in European lagoons in the context of climate change – Lagoons”), результати якого опубліковані в роботі [6]. В цьому проєкті використана еко-гідрологічна модель напіврозподілена модель SWIM з використанням “сценаріїв викидів” гілки A1B [7]. Пізніше математична модель SWIM була використана Дідовцем Ю. С. (науковий керівник Сніжко С. І., Київський національний університет імені Тараса Шевченка) для оцінки водних ресурсів репрезентативних водозборів України на базі даних траєкторій RCP4.5 та RCP8.5 [8]. Серед математичних моделей, які використовуються у Європі, велике поширення набула модель REMO. Ця модель об’єднує колишню чисельну модель прогнозу погоди EUROPA-MODEL для розрахунків термодинамічних характеристик і блоку глобальної кліматичної моделі ECHAM4 [9]. Модель REMO містить у собі гідрологічний блок, який дозволяє здійснювати прогнози кількісних показників стоку за даними відповідного кліматичного сценарію. Такий підхід був реалізований в Українському науково дослідному гідрометеорологічному інституті (УкрГМІ) НАН України [10]. Модель REMO сюжетної лінії A1B була використана у прогнозах наслідків змін клімату у басейні річки Дністер [11], водний режим якої досліджувався у рамках проєкту Європейської економічної комісії ООН (ЄЕК) та організації по безпеці і співробітництву у Європі

(ОБСЕ) [12].

Недоліком сучасних розподілених та напів-розподілених математичних моделей є вимога до значної щільності розташування кліматичних та гідрологічних станцій з метою детальної калібрування та верифікації моделей. Недостатня гідрометеорологічна вивченість України призводить до того, що при застосуванні цих моделей, апробація яких здебільшого виконувалась на річках Західної Європи, виникає необхідність введення калібровочних коефіцієнтів, щоб змодельовані значення відповідали спостереженням.

У той же час в Україні розроблено багато вітчизняних моделей, які використовувалися на протязі десятиріччя для розрахунків характеристик стоку при недостатності та відсутності даних спостережень і у подальшому застосовувались для оцінок характеристик водного режиму з використанням метеорологічних даних, наведених у кліматичних сценаріях. Прикладом таких моделей є операторна модель формування максимального стоку рівнинних річок України Є. Д. Гопченка, яка була модифікована В. А. Овчарук для розрахунків характеристик весняної повені та паводків за метеорологічними даними (опадами та температурами повітря), які визначають умови їх формування [13].

Балансові моделі, які використовують для визначення стоку річок метеорологічні дані, також широко застосовуються для оцінок змін водних ресурсів України в умовах кліматичних змін. Серед них найбільш відомі балансові моделі, розроблені в ОДЕКУ під керівництвом проф. Гопченка Є. Д. та Лободи Н. С. [14], та в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка під керівництвом проф. Сніжка С. І. [15]. В основі блоку розрахунків природного стоку моделі “клімат-стік” лежить метод водно-теплогового балансу водозбору у модифікації В. С. Мезенцева [16]. В основі математичної моделі С. М. Сніжка лежить балансова модель L. Turk [17]. Обидві моделі використовують складові теплового балансу земної поверхні, які у масових розрахунках визначаються через дані про температурний режим повітря. Підхід, запропонований французьким вченим L. Turk (1954), був успішно розвинутий польським гідрологом Z. Kaszmarek [18, 19, 20] і був запроваджений до розрахунків змін водних ресурсів України в умовах глобального потепління в Київському Національному Університеті імені Тараса Шевченка [19]. Порівняння результатів розрахунків для України за обома балансовими моделями показують близькі результати.

### 3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Модель “клімат-стік”, розроблена в ОДЕКУ під керівництвом проф. Гопченка Є. Д. та проф. Лободи Н. С., призначалася для оцінки характеристик стоку річок України на базі метеорологічних даних у зв’язку із відсутністю та недостатністю гідрологічних даних спостережень, а також значної трансформації стоку річок водогосподарською діяльністю [21]. Модель є балансовою і складається з двох блоків. Перший блок дозволяє виконувати розрахунки природного (непорушеного водогосподарською діяльністю) річного стоку, базуючись на метеорологічних даних. Другий блок дозволяє оцінювати характеристики побутового (трансформованого водо-господарською діяльністю) річного стоку. Теоретичною базою моделі при розрахунках природного річного стоку за метеорологічними даними (перший блок) є рівняння водно-теплогового балансу. Теоретичною базою моделі при оцінках характеристик побутового стоку (другий блок) є рівняння водогосподарських балансів, представлених в ймовірнісній формі. У другому блоці виконується стохастичне моделювання рядів природного та побутового річного стоку за моделлю простого ланцюга Маркова [22]. Модель дозволяє виконувати ймовірнісні оцінки характеристик стоку (за рік та по місяцях) на базі метеорологічної інформації та відомостей про масштаби водогосподарського використання стоку (зрошування, осушування, перекид та регулювання стоку штучними водоймами та інше). Модель “клімат-стік” включає до себе розрахунки за такими етапами формування стоку:

- визначення характеристик стоку за метеорологічними даними (кліматичний стік);
- урахування впливу підстильної поверхні та перехід до природного стоку;
- урахування впливу водогосподарської діяльності та визначення характеристик побутового стоку із використанням функцій антропогенного впливу, які є результатом імітаційного стохастичного моделювання.

Модель пройшла калібрування та верифікацію на даних метеорологічних та гідрологічних спостережень минулого сторіччя (до початку значущих змін клімату в Україні (1989 р. [23]) для різних географічних зон України та різних за розмірами водозборів. Методика розрахунків характеристик річного стоку за моделлю “клімат-стік” увійшла у нормативні документи по розрахунках гідрологічних характеристик республіки Молдова [24]. Порівняння норм річного

кліматичного стоку із фактичними даними були зроблені для водозборів річок України, які характеризуються стійким підземним живленням. Результати показали задовільну відповідність цих величин у різних географічних зонах України. Установлено, що норма річного кліматичного стоку, визначена за метеорологічними даними, є тотожною нормі зонального природного річного стоку, установленій за даними гідрологічних спостережень. Точність визначення норми річного кліматичного (зонального) стоку за картою ізоліній, побудованою на основі метеорологічних даних, становить  $\pm 10\%$ .

Саме за моделлю “клімат-стік” визначалися характеристики природного та побутового стоку невивчених у гідрологічному відношенні річок півдня України [25].

У 90-ті роки минулого сторіччя виникла необхідність надавати оцінки змін водних ресурсів за проєкціями кліматичних сценаріїв, спочатку глобальних, потім регіональних та за ансамблями глобальних та регіональних сценаріїв. Структура моделі “клімат-стік” дозволяє використовувати її для прогностичних розрахунків характеристик водних ресурсів України в умовах глобального потепління.

Середній багаторічний стік, розрахований за метеорологічними даними і позначений як  $Y_K$  (кліматичний стік) залежить від співвідношення  $\beta_x = \bar{X} / \bar{E}_m$  ресурсів тепла та вологи і розраховується за рівнянням водно-теплого балансу такого виду

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E}_m \left[ 1 + \left( \frac{\bar{X}}{\bar{E}_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

де  $\bar{Y}$ ,  $\bar{X}$ ,  $\bar{E}_m$  – середні багаторічні величини річного стоку, опадів та максимально можливого випаровування відповідно,  $n$  – параметр, який інтегрує вплив фізико-географічних умов формування стоку й береться рівним 3 згідно із рекомендаціями В. С. Мезенцева та дослідженнями, виконаними в ОДЕКУ.

Характеристика розглядається як показник посушливості близький за змістом до індексу Пенмана [26]. За просторовим розподілом цього індекса можна відслідкувати напрям змін основних кліматичних чинників формування стоку. Зонування території за  $\beta_x$  посушливості/зволоженістю відбувається за такими критеріями:

- $\beta_x \geq 1$  - зона надмірного зволоження;
- $0,8 \leq \beta_x < 1$  - зона достатнього зволоження;

- $0,5 \leq \beta_x < 0,8$  - зона недостатнього зволоження;
- $0,2 \leq \beta_x < 0,5$  - напіваридна зона;
- $0,03 \leq \beta_x < 0,2$  - аридна зона;
- $\beta_x < 0,03$  - гіпераридна зона.

У даній роботі використані кліматичні проєкції експерименту CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment), створеного Всесвітньою програмою досліджень клімату для формування ансамблю прогностичних регіональних кліматичних моделей CMIP5 [27]. Усього розглянуто 14 кліматичних моделей (табл. 1), в яких реалізовані траєкторії RCP4.5 та RCP8.5. Розрахунковий період становить 30 років (2021-2050 рр.). Оцінки кліматичного стоку надавалися у вузлах координатної сітки, положення яких відповідає координатам метеостанцій України та Молдови (загальне число дорівнює 115).

**Таблиця 1** - Перелік моделей експерименту CORDEX, використаних у роботі

| №  | Індекс моделі | Регіональна модель |
|----|---------------|--------------------|
| 1  | CLMcom1       | CLMcom-CCLM4-8-17  |
| 2  | CLMcom2       |                    |
| 3  | CLMcom3       |                    |
| 4  | CLMcom4       |                    |
| 5  | DMI1          | DMI-HIRHAM5        |
| 6  | DMI2          |                    |
| 7  | KNMI1         | KNMI-RACMO22E      |
| 8  | KNMI2         |                    |
| 9  | MPI           | MPI-CSC-REMO2009   |
| 10 | SMHI1         | SMHI-RCA4          |
| 11 | SMHI2         |                    |
| 12 | SMHI3         |                    |
| 13 | SMHI4         |                    |
| 14 | SMHI5         |                    |

Оцінки ресурсів вологи, тепла та водних ресурсів виконувались для кожної із 14 моделей траєкторій RCP4.5 й RCP8.5, а також за даними їх середньостатистичних моделей. Середня статистична модель є результатом осереднення даних, отриманих для всіх розглянутих моделей. Такий підхід вже був застосований авторами для оцінок водних ресурсів північно-західного Причорномор'я [28]. Було отримано, що різниця між результатами розрахунків водних ресурсів за різними моделями може бути дуже великою і призводити до протилежних результатів від +80% до -80%. Застосування середньої статистичної моделі дозволяє отримати осереднений варіант, у якому “нівелюються” похибки, окремо розглянутих моделей.

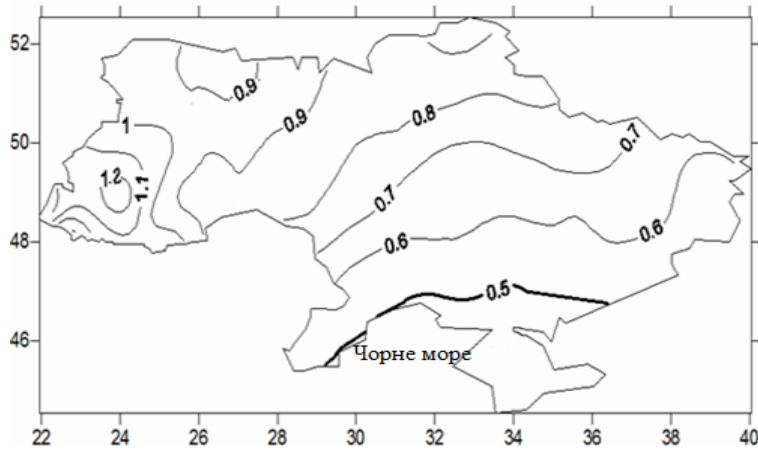
#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГРУНТУВАННЯ

На рисунках 1-3 представлений просторовий розподіл показника посушливості / зволоженості

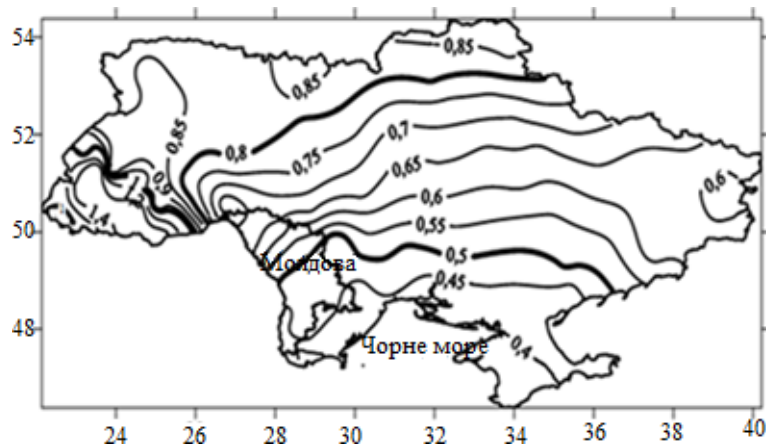
для різних кліматичних умов. Базовий стан (рис. 1) відповідає даним до початку значущих змін температури повітря на рівнинній території України (до 1989 р.). Положення ізолейн  $\beta x=0,5$ ;  $\beta x=1$  показують розташування різних кліматичних зон на території України.

За умови розвитку кліматичних змін за трак-

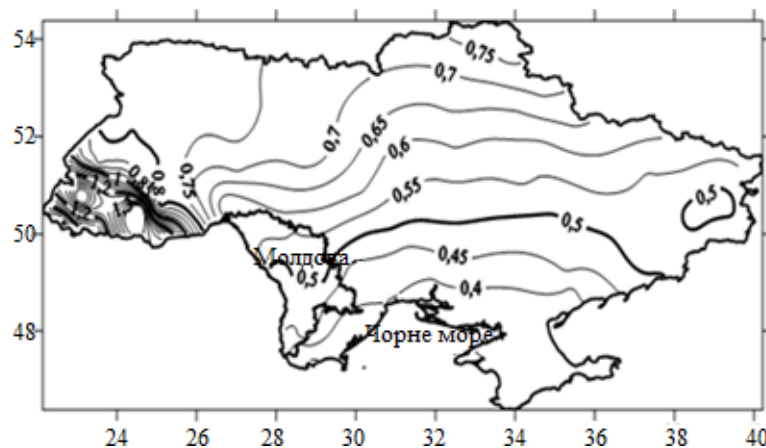
торією RCP4.5 (рис. 2) у період 2020-2050 рр. відбудеться розширення до півночі напіваридної зони ( $0,2 \leq \beta x < 0,5$ ) та зони недостатнього зволоження ( $0,5 \leq \beta x < 0,8$ ). На цьому рисунку видно, що ізолейні  $\beta x=0,9$  та  $\beta x=1,0$  майже “притискуються” до Українських Карпат.



**Рис. 1** – Просторовий розподіл показника зволоженості/посушливості, визначеного за даними до 1989 року (базове положення) [5]



**Рис. 2** – Просторовий розподіл показника зволоженості/посушливості, визначеного за даними траєкторії RCP4.5 (середньостатистична модель) для періоду 2021-2050 рр.



**Рис. 3** – Просторовий розподіл показника зволоженості/посушливості, визначеного за даними траєкторії RCP8.5 для періоду 2021-2050 рр.

За умови здійснення траєкторії RCP8.5 (на сьогоднішній розвиток кліматичних умов в Україні відбувається саме за нею) зона достатнього зволоження ( $0,8 \leq \beta x < 1$ ) у досліджуваний період 2021-2050 рр. дуже скоротиться у розмірах (рис. 3). Практично вся рівнинна територія України буде знаходитися у зоні недостатнього зволоження ( $0,5 \leq \beta x < 0,8$ ). Напіваридна зона буде займати більшу площу ніж за траєкторією RCP4.5, але головні зміни будуть проявлятися у тому, що визначальними кліматичними умовами України стануть умови зони степу (недостатнього зволоження).

Що стосується природної географічної зони Українських Карпат, то на цій території зберуться значення  $\beta x \geq 1,0$ , хоча виділиться область Закарпаття, де  $0,8 \leq \beta x < 1$ . Оцінка можливих змін водних ресурсів у самих Карпатах має підлягати подальшим дослідженням, оскільки при  $\beta x \geq 1,0$  самі значення  $\beta x$  будуть меншими у порівнянні із базовим періодом (до 1989 р.).

Оцінка змін водних ресурсів території представлена у вигляді ізоліній відносних відхилень середніх багаторічних величин річного стоку, які спостерігались до 1989 р. (базовий період) та визначені за кліматичними сценаріями для розрахункового періоду 2021-2050 рр.

$$\delta = \frac{\bar{Y}_K' - \bar{Y}_K}{\bar{Y}_K} * 100\%, \quad (2)$$

де  $\bar{Y}_K'$  - середня багаторічна величина річного кліматичного (зонального) стоку, розрахованого

за сценарними даними, мм;  $\bar{Y}_K$  - середня багаторічна величина річного кліматичного (зонального) стоку, розрахованого за даними до 1989 р. (до початку значущого впливу глобального потепління на температурний режим України).

Згідно із даними середньої статистичної моделі траєкторії RCP4.5 (рис. 4). у період 2021-2050 рр. майже на всій на рівнинній території України очікується зменшення водних ресурсів. Лише на півночі та сході буде спостерігатися їх зростання. Найбільше будуть підлягати впливу кліматичних змін південно-західні території, де зменшення ресурсів зволоження (рис. 5) буде супроводжуватися зростанням ресурсів тепла (рис. 6). Водні ресурси будуть змінюватися від мінус 10% на північному заході до мінус 30-40% у північно-західному Причорномор'ї. У Карпатах та у східній частині України можливе зростання водних ресурсів від 10% до 20%.

Поява лінії розділу, яка відповідає нульовій ізолінії, обумовлена неоднаковими тенденціями у змінах річних сум опадів: на західній та північно-західній частинах України вони будуть зменшуватися, а на східній та північно-східній - зростати (рис.5). Окрім того, на сході країни зростання ресурсів тепла (максимально-можливого випаровування) буде відбуватися більш уповільнено ніж на заході (рис.6).

За траєкторією RCP8.5 (рис. 7) отримуємо, що на всій території України буде спостерігатися зменшення водних ресурсів. "Острів" зростання водних ресурсів залишиться лише на Буковині.

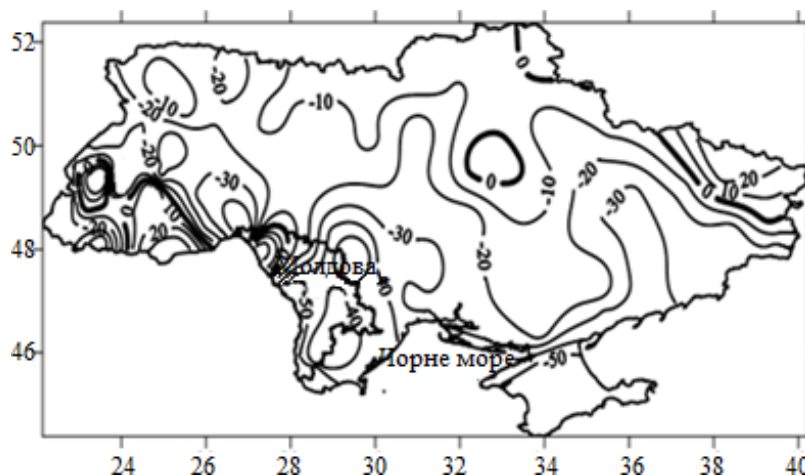
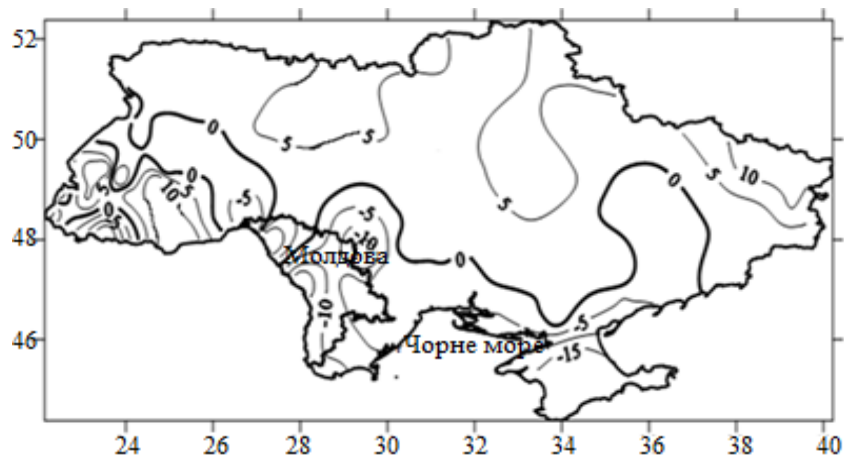
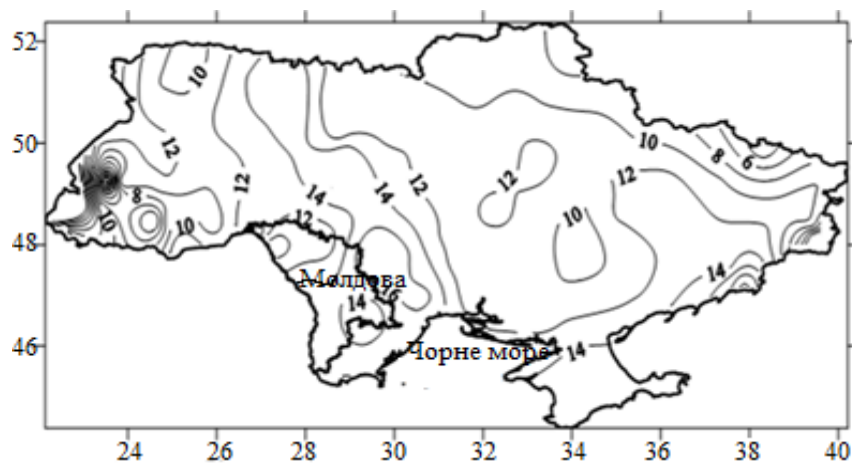


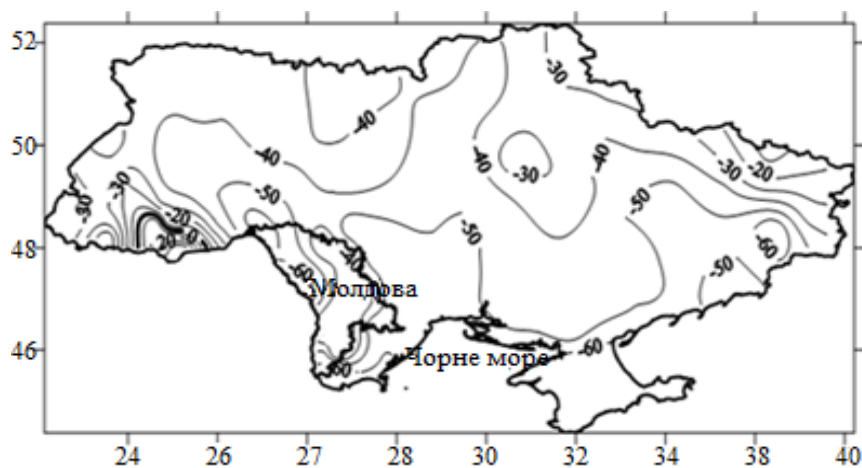
Рис. 4 – Зміни у просторі водних ресурсів (середньостатистична модель траєкторії RCP4.5) для періоду 2021-2050 рр. при порівнянні із базовими даними до 1989 р.



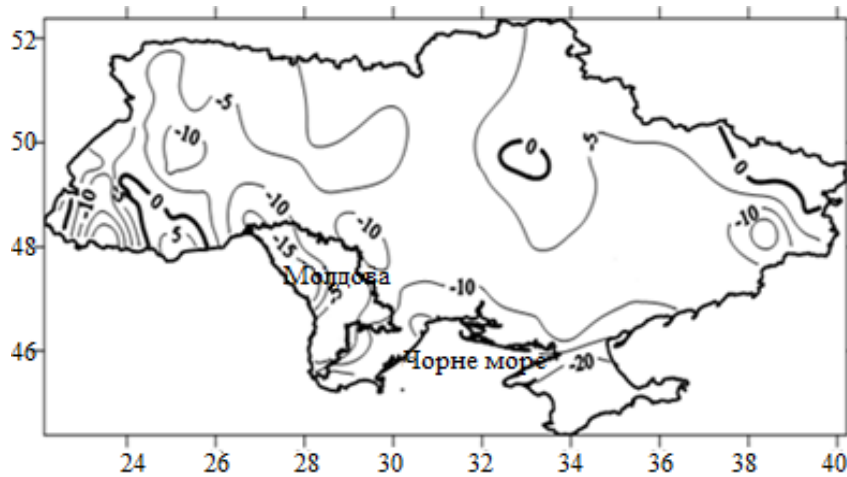
**Рис. 5** – Зміни у просторі ресурсів зволоження (середньостатистична модель траєкторії RCP4.5) для періоду 2021-2050 рр. при порівнянні із базовими даними (до 1989 р.)



**Рис. 6** – Зміни у просторі ресурсів тепла, визначених за даними траєкторії RCP4.5 (середньостатистична модель) для періоду 2021-2050 рр. при порівнянні із базовими даними до 1989 р.



**Рис. 7** – Зміни у просторі водних ресурсів (середньостатистична модель траєкторії RCP8.5) для періоду 2021-2050рр. при порівнянні із базовими даними до 1989 р.



**Рис. 8** – Зміни у просторі ресурсів зволоження (середньостатистична модель траєкторії RCP8.5) для періоду 2021-2050рр. при порівнянні із базовими даними до 1989 р.

На півдні і південному заході зменшення водних ресурсів буде досягати мінус 60%, на північному сході - мінус 30, на північному заході – мінус 40%. Зниження ресурсів зволоження на півдні буде перебільшувати мінус 10%, досягаючи максимуму, який дорівнюватиме мінус 20% (рис. 8). Зміни ресурсів тепла на більшій частині України будуть становити +14%, у межах Причорноморської низовини – варіювати від +16% до +18%. Лише в Українських Карпатах на значних висотах зростання максимально можливого випаровування не виявлене.

## 5. ВИСНОВКИ

Установлено, що за метеорологічними даними середньої статистичної моделі, отриманою для ансамблю моделей змін клімату експерименту CORDEX для траєкторій RCP4.5 та RCP8.5 у період 2021-2050 рр. (при порівнянні із періодом до 1989 р., який є базовим) очікується розширення напіваридної зони ( $0,2 \leq \beta x < 0,5$ ) та зони недостатнього зволоження ( $0,5 \leq \beta x < 0,8$ ). Просування зони недостатнього зволоження буде відбуватися не тільки на північ, але і на північний захід. Наслідки змін водних ресурсів за траєкторією RCP8.5 будуть більш “жорсткими”, ніж за траєкторією RCP4.5. За траєкторією RCP4.5 зміни водних ресурсів досягнуть мінус 50-60% на півдні та мінус 10% на півночі, за траєкторією RCP8.5 – мінус 60% на півдні до мінус 30-40% на півночі. Основною причиною зменшення водних ресурсів буде зростання ресурсів тепла на фоні переважно незначних (до  $\pm 10\%$ ) змін ресурсів зволоження. При розвитку подій за траєкторією RCP4.5 в Українських Карпатах (за виключенням Закарпаття) можливе

зростання водних ресурсів. Згідно із траєкторією RCP8.5 область зростання водних ресурсів обмежиться Буковиною.

Розрахунки індексів зволоженості/ посушливості показали, що в Українських Карпатах збережеться зона надмірного зволоження. Однак, перевищення ресурсів зволоження над ресурсами тепла стане меншим ніж у базовому періоді, що призведе до зниження водних ресурсів річок Українських Карпат. Дослідження змін водних ресурсів Українських Карпат в залежності від висоти місцевості мають бути проведені більш детально.

*Автори висловлюють глибоку подяку д.геогр.н., проф. Хохлову В.М. за допомогу у підготовці до моделювання стоку вихідних даних кліматичних сценаріїв.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України / під ред. Степаненка С. М., Польового А. М. Одеса: Екологія. 2011. 696 с.
2. Директива 2000 / 60/ ЄС Європейського Парламенту і ради від 23 жовтня 2000 року про встановлення рамок діяльності Співтовариства у сфері водної політики. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/371-2015-p> (дата звернення : 08.02.2019)
3. Лобода Н. С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния : монография. Одесса : Екологія, 2005. 208 с.
4. Loboda N. S. The assessment of present and future Ukrainian water resources on meteorological evidence. *Climat and Water*. 1998. 1. Pp. 1486-1494.
5. Лобода Н. С., Божок Ю. В. Водні ресурси України XXI сторіччя за сценаріями змін клімату (RCP8.5 та RCP4.5). *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. № 17. С. 114-122. <https://doi.org/10.31481/>

uhmj.17.2016.13

6. Tuchkovenko Yu., Loboda N., Khokhlov V. The physio-geographical background and ecology of Tyligulskyi Liman Lagoon. *Coastal Lagoons in Europe: Integrated Water Resource Strategies* / Edited by Anna I., Lillebø, Per Stålnacke and Geoffray, D. Gooch. London: IWA Publishing. ISBN: 9781780406282. 2015. Pp. 77-86.
7. Krysanova V., Wechsung F. *SWIM (Soil and Water Integrated model): user Manual*. 2000. 239 p.
8. Assessment of climate change impacts on water resources in three representative Ukrainian catchments using eco-hydrological modeling / Didovets I., Lobanova., Bronstert. et al. *Water (Switzerland)*. 2017. №9(3). <https://doi.org/10.3390/w9030204>
9. The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate / Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L. et al. Max-Planck-Institute für Meteorologie, Report, 1996. 90 p. URL: [https://mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/MI-Report\\_218.pdf](https://mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/MI-Report_218.pdf) (Accessed 01.06.2020)
10. Краковська С. В., Гнатюк Н. В. Зміни поверхневого річкового стоку в Україні до 2050 р. за проєкцією регіональної кліматичної моделі REMO. Наукова електронна бібліотека періодичних видань НАН України: веб-сайт. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/97926-08Krasovska.pdf?sequence=08> (дата звернення: 21.04.2020).
11. Гребінь В. В., Мудра К. В. Використання регіональної моделі клімату (REMO) для оцінювання тенденцій коливань стоку води в басейні Дністра. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія*. 2018. Т. 1 (70). С. 22-28.
12. Strategic Framework for Adaptation to Climate Change in the Dniester River Basin / Korneev V. N., Volchak A. A., Hertman L. N et al. ENVSEK-UNEKE-OCCE, 2015. 71 p.
13. Овчарук В. А., Гопченко Є. Д. Сучасна методика нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок України. *Український географічний журнал*. 2018. № 2 (102). С. 26-33.
14. Gopchenko E.D., Loboda N.S. An evaluation of possible changes in water resources of Ukraine under global warming conditions. *Hydrobiological Journal*. 2001. 37(5). С. 105-117.
15. Технологічна схема використання водно-балансової моделі Турка для регіональних симуляцій водного стоку на довгострокову перспективу / Сніжко С. І., Ободовський О. Г., Шевченко О. Г. та ін. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. №3 (54). С. 80-81
16. Мезенцев В. С., Карнацевич И. В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. Ленинград : Гидрометеоздат, 1969. 75 с.
17. Turc L. Le bilan d'eau des sols. Relation entre la précipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*. 1954. 5. Pp. 491-569.
18. Kaczmarek Z. Water balance model for climate impact analysis. *Acta Geophysica Polonica*. 1993. №41 (4). Pp. 423-437.
19. Сніжко С., Купріков І., Шевченко О. Оценка изменения водного стока рек Украины на основе водно-балансовых моделей. *Фізична географія та геоморфологія*. 2012. Вип. 2 (66). С. 157-161.
20. Сніжко С., Яцюк М., Купріков І. Оцінка можливих змін водних ресурсів місцевого стоку в Україні в XXI столітті. *Водне господарство України*. 2012. №6 (102). С. 8-16.
21. Гопченко Є. Д., Лобода Н. С. Оцінювання природних водних ресурсів України за методом водно-теплогового балансу. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2001. Вип. 249. С.106-120.
22. Лобода Н. С., Гопченко Є. Д. Стохастичні моделі у гідрологічних розрахунках : навчальний посібник. Одеса: Екологія, 2006. 200 с.
23. Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) : монографія. Київ : Ніка-центр, 2010. 316 с.
24. СРД.01.05-2012 : Определение гидрологических характеристик для условий Республики Молдова / Агентство строительства и развития Республики Молдова. Кишинев, Молдова, 2012. 180 с.
25. Гопченко Е. Д., Лобода Н. С. Водные ресурсы северо-западного Причерноморья (в естественных и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях). Київ : КНТ. 2005. 188 с.
26. Дж. К. Родда. Грани гидрологии : монография. Ленинград : Гидрометеоздат, 1987. Т. 2. 534 с.
27. Giorgy F., Jones C., Ghassem R. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin*. 2009. 58 (3). Pp. 175-183.
28. Лобода Н. С., Куза А. М., Козлов О. М. Оцінка можливих змін водних ресурсів річок водозбору Куяльницького лиману на початку XXI сторіччя (2021-2050 рр.) за моделями кліматичного сценарію RCP4.5. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 23. С.42-53. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.05>

## REFERENCES

1. Stepanenko, S.M. & Polevoy, A.M. (2011). *Otsinka vplyvu klimatychnykh zmin na haluzi ekonomiky Ukrainy [Assessment of the impact of climate change on the economy of Ukraine]*. Odesa: Ecology. (in Ukr)
2. *Dyrektyva 2000 / 60/ YeS Yevropeiskoho Parlamentu i rady vid 23 zhovtnia 2000 roku pro vstanovlennia ramok diialnosti Spivtovarystva u sferi vodnoi polityky [Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy]*. Available at: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/371-2015-p> (Accessed: 08.02.2019). (in Ukr)
3. Loboda, N.S. (2005). *Raschety i obobshheniya kharakteristik godovogo stoka rek Ukrainy v usloviyakh antropogennogo vliyaniya [Calculations and generalizations of characteristics of annual runoff of rivers of Ukraine in the conditions of anthropogenic influence]*. Odessa: Ecology. (in Russ)
4. Loboda, N.S. (1998). The assessment of present and future Ukrainian water resources on meteorological evidence. *Climat and Water*, 1, pp. 1486-1494.
5. Loboda, N.S. & Bozhok, U.V. (2016). [Water resources of Ukraine of the XXI century according to climate change scenarios (RCP8.5 and RCP4.5)]. *Ukr. gidrometeorol. ž. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, №17, pp. 114-122. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.13> (in Ukr)
6. Tuchkovenko, Yu., Loboda, N. & Khokhlov, V. (2015). The physio-geographical background and ecology of Tyligulskyi Liman Lagoon. In: Anna I., Lillebø, Per Stålnacke and Geoffray, D. Gooch (eds). *Coastal Lagoons in Europe: Integrated Water Resource Strategies*. London: IWA Publishing, ISBN: 9781780406282, pp. 77-86.
7. Krysanova, V. & Wechsung, F. (2000). *SWIM (Soil and Water Integrated model): User Manual*.
8. Didovets, I., Lobanova, A., Bronstert, A. et al. (2017).

- Assessment of climate change impacts on water resources in three representative Ukrainian catchments using eco-hydrological modeling. *Water (Switzerland)*, №9(3). <https://doi.org/10.3390/w9030204>
9. Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L. et al. (1996). *The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate*. Max-Planck-Institute für Meteorologie, Report. Available at: [https://mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/MP-PI-Report\\_218.pdf](https://mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/MP-PI-Report_218.pdf) (Accessed 01.06.2020)
  10. Krakovska S.V. & Gnatiuk N.V. *Zminy poverkhnevoho richkovoho stoku v Ukraini do 2050 r. za proektsiieiu rehionalnoi klimatichnoi modeli REMO. [Changes in surface river runoff in Ukraine until 2050. according to the projection of the regional climate model REMO]*. Scientific electronic library of periodicals of the National Academy of Sciences of Ukraine: website. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/97926-08Krasovska.pdf?sequence> (Accessed: 21.04.2020) (in Ukr.)
  11. Grebin, V.V. & Mudra, K.V. (2018). [Using the Regional Climate Model (REMO) to assess trends in water runoff fluctuations in the Dniester basin]. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geography*, T. 1 (70), pp. 22-28. (in Ukr.)
  12. Korneev, V.N., Volchak, A.A., Hertman, L.N et al. (2015). *Strategic Framework for Adaptation to Climate Change in the Dniester River Basin*. ENVSEK–UNEKE–OCCE.
  13. Ovcharuk, V.A. & Gopchenko, Ye.D. (2018). [The modern method of maximum spring flood runoff characteristics valuation for the plain rivers of Ukraine]. *Ukrainskyi heografichnyi zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 2(102), pp. 26-33. <https://doi.org/10.15407/ugz2018.02.026>. (in Ukr.)
  14. Gopchenko, E.D. & Loboda, N.S. (2001). [An evaluation of possible changes in water resources of Ukraine under global warming conditions]. *Hydrobiological Journal*. pp. 105-117.
  15. Snizhko, S.I., Obodovsky, O.G., Shevchenko, O.G. et al. (2019). [Technological scheme of using the water balance model of the Turk for regional simulations of water runoff in the long run]. *Hidrologiia, hidrokhimiia i hidroekologiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, №3 (54), pp. 80-81 (in Ukr.)
  16. Mezentssev, V.S. & Karnatsevich, I.V. (1969). *Uvlazhnennost' Zapadno-Sibirskoi ravniny [Humidity of the West Siberian plain]*. Gidrometeoizdat. (in Russ.)
  17. Turc, L. (1954). Le bilan d'eau des sols. Relation entre la précipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*, 5, pp. 491-569.
  18. Kaczmarek, Z. (1993). Water balance model for climate impact analysis. *Acta Geophysica Polonica*, №41 (4) pp. 423-437.
  19. Snizhko, S., Kuprikov, I. & Shevchenko, O. (2012). [Estimation of change of water runoff of rivers of Ukraine on the basis of water-balance models]. *Physical geography and geomorphology*, 2 (66), pp. 157-161. (in Ukr.)
  20. Snizhko, S., Yatsyuk, M. & Kuprikov, I. (2012). [Estimation of possible changes of water resources of local runoff in Ukraine in the XXI century]. *Water management of Ukraine*, №6 (102), C. 8-16. (in Ukr.)
  21. Gopchenko, E.D. & Loboda, N.S. (2001). [Estimation of natural water resources of Ukraine by the method of water-heat balance]. *Nauk. Pratsi UkrNDGMI [Proceed. of UkrSRHMI]*, 249, pp106-120. (in Ukr.)
  22. Loboda, N.S. & Gopchenko, E.D. (2006). *Stokhastychni modeli u hidrolohichnykh rozrakhunkakh [Stochastic models in hydrological calculations]*. Odesa: Ecology. (in Ukr.)
  23. Grebin, V.V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhyim richok Ukrayiny (landshaftno-hidrolohichniy analiz) [The modern water conditions of Ukrainian rivers (landscape-hydrological analysis)]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
  24. Agentia constructui si dezvoltarea teritoriului a Republicii Moldova (2012). *CPD.01.05-2012: Opredelenie gidrologicheskikh kharakteristik dlya usloviy Respubliki Moldova [Determination of hydrological characteristics for the conditions of the Republic of Moldova]*. Chişinău, Moldova. (in Russ.)
  25. Gopchenko, E.D. & Loboda, N.S. (2005). *Vodnye resursy severo-zapadnogo Prichernomor'ya (v estestvennykh i narushennykh khozyaystvennoy deyatel'nosti usloviyakh) [Water resources of the north-western Black Sea coast (in natural and disturbed conditions by economic activity)]*. Kiev: CST. (in Russ.)
  26. Rodda, J.K. (1987). *Grani gidrologii [Verge of hydrology]*. Leningrad: Hydrometeoizdat, vol.2.
  27. Giorgy, F., Jones, C. & Ghassem, R. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58 (3). pp. 175-183.
  28. Loboda, N.S., Kuza A.M. & Kozlov M.O. (2019). [Assessment of possible changes in water resources of Kuyalnytsya estuary catchment rivers at the beginning of the XXI century (2021-2050) according to the models of the climate scenario RCP4.5]. *Ukr. gidrometeorol. zh. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, № 23. pp. 42-53. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.05> (in Ukr.)

## ASSESSMENT OF WATER RESOURCES OF THE UKRAINIAN RIVERS ACCORDING TO THE AVERAGE STATISTICAL MODELS OF CLIMATE CHANGE TRAJECTORIES RCP4.5 AND RCP8.5 OVER THE PERIOD OF 2021 TO 2050

N. S. Loboda, M. O. Kozlov

*Odessa State Environmental University, 15 Lvivska str., 65016, Odessa, Ukraine*

The relevance of the presented work is due to the necessity of assessment of a possible state of Ukrainian water resources in the 21st century according to climate change scenarios in order to justify the strategy of economic development.

The research object is presented by water resources of the Ukrainian rivers.

The research focuses on the effects of global warming on Ukrainian water resources in 2021-2050.

The work aims at assessing a possible impact of climate change on Ukrainian water resources in the 21st century, using the data from the climate change trajectories RCP4.5 and RCP8.5 over the period of 2021 to 2050.

Calculations of water resources over the period of 2021 to 2050 are performed according to the average statistical model from the ensemble consisting of 14 climatic models of the CORDEX experiment for the RCP4.5 and RCP8.5 trajectories. Water resources are assessed based on the Climate-runoff model developed by OSENU. The result of such calculations is the evaluation of moisture and heat resources, as well as water resources in the natural conditions of their formation. Natural (undisturbed by water management) average long-term annual runoff determined by the meteorological data is usually called "a climatic runoff". The accuracy of climatic runoff calculations using the map of isolines is  $\pm 10\%$ . The calculations are performed in the grid nodes. The geographical location of the selected nodes corresponds to the location of meteorological stations the total number of which is 115.

Evaluation of heat, moisture and water resources changes was performed by comparing the calculated values and the basic ones. The climatic runoff for the period of observations before 1989 is thought to be basic.

According to the average statistical model of the RCP4.5 trajectory over the period of 2021 to 2050, the expansion of the semi-arid zone and insufficient humidification zone to the north is to be expected (when compared to the basic period). The insufficient humidification zone will expand to the northwest displacing the sufficient humidification zone. The reduction of water resources will reach to minus 40-50% in the south of the country and to 0% - minus 10% in the north. The area of water resources growth will be preserved in the Ukrainian Carpathians.

Comparing to the RCP4.5 the RCP8.5 trajectory is considered to be more "rigid" in relation to the state of Ukrainian water resources. The reduction of water resources will occur on the nearly entire territory, except Bukovyna, due to the increase of arid climate. Water resources will decrease to minus 50-60% in the south and to minus 30% in the north.

Both RCP4.5 and RCP8.5 trajectories offer a forecast of water resources that is unfavourable for the development of Ukrainian economy, as it will cause expansion of both semi-arid and insufficient humidification zones. This will increase the water resources shortage in Ukraine.

Keywords: climate scenarios, average statistical model, impact of climate changes on water resources, «climate-runoff» model.

## **ОЦЕНКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕК УКРАИНЫ ПО СРЕДНИМ СТАТИСТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ ТРАЕКТОРИЙ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА RCP4.5 И RCP8.5 В ПЕРИОД 2021-2050 ГОДЫ**

**Н. С. Лобода, М. А. Козлов**

*Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина,*

Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью оценки возможного состояния водных ресурсов Украины в XXI веке по сценариям изменения климата для обоснования стратегии экономического развития.

Объектом исследования являются водные ресурсы рек Украины.

Предметом исследования являются последствия влияния глобального потепления на водные ресурсы Украины в 2021-2050 гг.

Целью работы является оценка влияния возможных изменений климата на водные ресурсы Украины в XXI веке с использованием данных траекторий изменений климата RCP4.5, RCP8.5 в период 2021-2050 гг.

Расчеты водных ресурсов в период 2021-2050 гг. выполнены по средней статистической модели из ансамбля 14 климатических моделей эксперимента CORDEX для траекторий RCP4.5 и RCP8.5. Водные ресурсы оценены по модели "климат-сток", разработанной в ОГЭКУ. Результатом расчетов являются оценки ресурсов влаги и тепла, а также водных ресурсов в естественных условиях их формирования. Естественный (ненарушенный водохозяйственной деятельностью) средний многолетний годовой сток, определенный по метеорологическим данным, рассматривается как "климатический". Точность расчетов

климатического стока по карте изолиний составляет  $\pm 10\%$ . Расчеты выполнены в узлах координатной сетки. Географическое положение избранных узлов соответствует расположению метеорологических станций, общее количество которых составляет 115.

Оценка изменений ресурсов тепла, увлажнения и водных ресурсов выполнялась путем сравнения рассчитанных величин с базовыми. Базовым является климатический сток за период наблюдений до 1989 г.

Установлено, что для средней статистической модели для траектории RCP4.5 в период 2021-2050 гг. по сравнению с базовым периодом ожидается расширение к северу полуаридной зоны и зоны недостаточного увлажнения. Зона недостаточного увлажнения будет продвигаться к северо-западу, сжимая зону достаточного увлажнения. Уменьшение водных ресурсов будет достигать минус 40-50% на юге страны и 0% – минус 10% на севере. Область увеличения водных ресурсов сохранится в Украинских Карпатах.

Траектория RCP8.5 является более "жесткой" по отношению к состоянию водных ресурсов Украины при сравнении с траекторией RCP4.5. Уменьшение водных ресурсов будет происходить почти на всей территории из-за увеличения засушливости климата, исключая Буковину. Водные ресурсы уменьшатся до минус 50-60% на юге страны и до минус 30% на севере.

Для двух траекторий RCP4.5 и RCP8.5 прогноз состояния водных ресурсов является неблагоприятным для развития экономики Украины, поскольку будет расширяться не только полуаридная зона, но и зона недостаточного увлажнения, что вызовет рост дефицита водных ресурсов в Украине.

**Ключевые слова:** климатические сценарии, средняя статистическая модель, влияние изменений климата на водные ресурсы, модель "климат-сток".

Подання до редакції : 13. 05. 2020  
Надходження остаточної версії : 28. 05. 2020  
Публікація статті : 03. 07. 2020

УДК 551.46.0:551.465

## ПРОГНОЗУВАННЯ ШТОРМОВИХ ВІДГІННО-НАГІННИХ КОЛИВАНЬ РІВНЯ МОРЯ В ПОРТАХ ОДЕСЬКОГО РАЙОНУ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ЧОРНОГО МОРЯ

Ю. С. Тучковенко<sup>1</sup>, О. С. Матигін<sup>2</sup>, В. Ю. Чепурна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,  
tuch2001@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

<sup>2</sup> Гідрометцентр Чорного та Азовського морів, Французький бульвар, 89, 65009, Одеса, Україна,  
pgdgmccham@meteo.gov.ua

Збільшення осадки суден, які може прийняти порт для завантаження біля причалів, є одним з основних напрямків розвитку і підвищення вантажообігу морських торговельних портів Одеського району північно-західної частини Чорного моря (Чорноморськ, Одеса, Південний). Для забезпечення безпеки судноплавства в акваторії портів і на підхідних каналах до них актуальною задачею є оперативне прогнозування викликаних штормовими вітрами короточасних коливань рівня моря. Стаття присвячена аналізу і обговоренню результатів випробування спрощеної 2-D гідродинамічної моделі для прогнозування викликаних штормовими вітрами відгінно-нагінних коливань рівня моря в районах морських портів Одеського району північно-західної частини Чорного моря. Просторово-часова мінливість вітрових умов на межі розділу «море-атмосфера» задавалась на основі даних синоптичного прогнозу на 10 діб наданого за глобальною атмосферою моделлю GFS (Global Forecast System). Аналізувались результати прогнозу значних (більше 30 см) короточасних знижень і підвищень рівня моря в портах, які спостерігались в 2016, 2017 та 2020 рр.

Встановлено, що при використанні даних GFS-прогнозу характер викликаних штормовими вітрами денівеляцій рівня моря та їх амплітуда, в переважній більшості розглянутих випадків, починають наближатися до спостережених при завчасності прогнозу не більше 4 діб. Тобто точність прогнозу мінливості вітрових умов за моделлю GFS з більшою завчасністю є недостатньою для прогнозування викликаних штормовими вітрами коливань рівня моря. Отримана прийнятна відповідність між прогнозованими із завчасністю 1-3 доби і спостереженими значеннями амплітуд денівеляцій рівня моря. Зокрема, при завчасності прогнозу  $\approx 2$  доби, для розглянутих штормових випадків середня абсолютна помилка прогнозу амплітуди коливань рівня складала 7-8 см, при допустимому її значенні 15 см, а середня відносна – 16-18%. Зроблено висновок про те, що гідродинамічна модель, у варіанті із використанням прогностичної інформації щодо мінливості вітрових умов, яка одержується за допомогою моделі прогнозу погоди GFS, може застосовуватись для оперативного прогнозу викликаних штормовим вітром денівеляцій рівня моря із завчасністю до 4 діб.

**Ключові слова:** північно-західна частина Чорного моря, порти, штормові коливання рівня моря, прогнозування.

### 1. ВСТУП

Одним з напрямків розвитку і підвищення вантажообігу морських торговельних портів (МТП – Чорноморськ, Південний, Одеса) Одеського району північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ) є поглиблення підхідних каналів та операційної акваторії порту для збільшення можливої осадки суден, які може прийняти порт для завантаження біля причалів. В останні роки МТП Південний (Южний) приймав і обробляв біля причалів балкери (в тому числі типу «Capesize») дедвейтом 170-200 тис.тон з осадкою до 18,5 м, а МТП Чорноморськ – великото-

нажні судна з осадкою до 14,5 м типу Panamax і post-Panamax дедвейтом до 75 тис. тон (з навантаженням до повної місткості).

Для забезпечення безпеки судноплавства в акваторії портів і на підхідних каналах до них, при виході з порту максимально завантажених біля причалів суден, повинен дотримуватися встановлений для них мінімальний запас глибини під кілем. При сильних вітрах на запас глибини під кілем судна значно впливають викликані вітром відгінно-нагінні коливання рівня моря, які можуть призводити до швидкого підйому або спаду рівня моря в портах Одесько-

го району ПнЗЧМ до 0,9-1,0 м. Тому оперативне прогнозування відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах і на підходах до них є актуальною задачею.

Різні методичні підходи до вирішення проблеми оперативного короткострокового прогнозування викликаних вітром коливань рівня моря в портах Одеського району ПнЗЧМ розглядались в роботах [1-5]. Авторами [3] були виявлені ефективні напрямки вітру, які обумовлюють відгони і нагони в портах Південний та Чорноморськ, встановлені статистичні зв'язки між відгінно-нагінними коливаннями рівня моря та дією вітру, визначенні статистичні рівняння для розрахунків змін рівня, окремо, під час його спаду і підйому. Аргументами в розрахункових рівняннях є початкове значення рівня моря і сума проекцій вітру на ефективні напрямки за попередні 30 годин. В роботі [4] визначались можливості застосування для прогнозування відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Одеського району комплексу інтегрованих чисельних моделей Delft3D-FLOW + SWAN у варіанті з асиміляцією метеорологічної інформації, яка отримується із використанням глобальної чисельної моделі прогнозу погоди GFS (Global Forecast System) Національної метеорологічної служби США [6]. Застосовується метод «телескопізації» криволінійних розрахункових сіток з різною просторовою деталізацією для забезпечення необхідної роздільної здатності у просторі результатів прогнозування. Для акваторії Одеського району ПнЗЧМ деталізація розрахунків складала 90-250 м.

В роботах [1, 2, 5] для відтворення часової мінливості відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Одеса, Чорноморськ, Південний застосовувалась авторська чисельна гідродинамічна модель, яка заснована на вирішенні рівнянь теорії «мілкої води» у 2D наближенні [7-9]. Результати верифікації моделі з просторовим розділенням 1 км, при її застосуванні в імітаційному режимі з асиміляцією даних архівів реаналізу і прогнозу вітру, отриманих за моделлю GFS для 2010, 2016, 2017 рр., показали [5], що модель здатна правильно відтворювати мінливість коливань рівня моря в результаті вітрової дії. Отримано задовільну відповідність модельних і спостережених кривих часового ходу значних денівеляцій рівня моря, викликаних вітром, на підходах до портів Одеського регіону ПнЗЧМ. Забезпеченість імітаційних розрахунків за моделлю склала 84-91 %. Хоча модель [5] має

спрощену, порівняно з [4], математичну структуру, однак переваги її застосування в оперативній прогностичній практиці Гідрометцентру Чорного і Азовського морів (на даному етапі розбудови національної системи морських прогнозів) полягають у невибагливості до наявних комп'ютерних ресурсів.

Метою цієї роботи є викладення і обговорення результатів застосування 2-D гідродинамічної моделі, сукупно з даними прогнозу просторово-часової мінливості вітрових умов, отриманими за глобальною чисельною атмосферною моделлю GFS, для оперативного прогнозування викликаних штормовими вітрами значних відгінно-нагінних коливань рівня моря в районах морських портів Одеського району північно-західної частини Чорного моря.

## 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВХІДНІ ДАНІ

Система гідродинамічних рівнянь моделі записується у такому вигляді [1, 5]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{1}{\rho_w H} (\tau_{sx} - \tau_{bx}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \xi}{\partial y} = \frac{1}{\rho_w H} (\tau_{sy} - \tau_{by}), \quad (2)$$

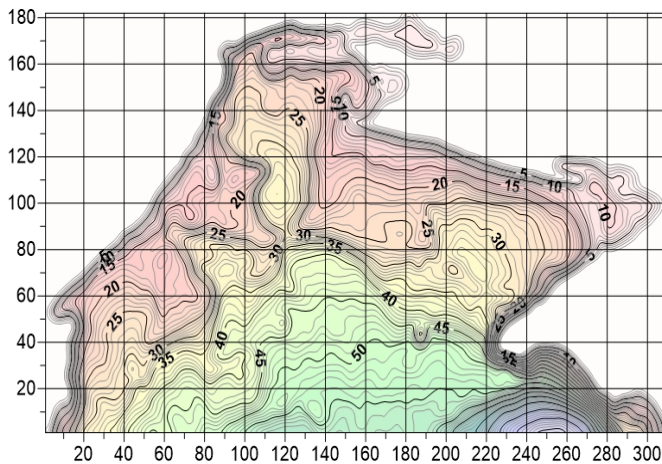
$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{\partial (HV)}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

де  $U, V$  – компоненти вектору  $\vec{V}(U, V)$  середньої за глибиною швидкості течій по осях  $x$  та  $y$ , відповідно;  $H = h + \xi$  – повна глибина;  $h$  – глибина на незбуреній воді;  $\xi$  – відхилення рівневої поверхні від незбуреного стану (денівеляція рівня);  $\rho_w$  – густина води;  $\tau_{sx}, \tau_{sy}$  та  $\tau_{bx}, \tau_{by}$  – компоненти по осях  $x$  та  $y$  векторів дотичних напружень поверхневого  $\vec{\tau}_s(\tau_{sx}, \tau_{sy})$  і придонного  $\vec{\tau}_b(\tau_{bx}, \tau_{by})$  тертя;  $f = 2\omega \sin \varphi$  – параметр Коріолісу;  $\omega$  – вертикальна складова вектору кутового обертання Землі;  $\varphi$  – широта місця;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $t$  – час.

Граничні умови, які застосовуються для чисельного вирішення системи рівнянь (1)-(3), ви-

кладені в [5]. Рівняння моделі, з відповідними граничними умовами, апроксимуються на рівномірній просторовій сітці, що переважається, із застосуванням чисельного кінцево-різницевого методу викладеного в [1].

При розрахунках акваторія ПнЗЧМ (рис. 1) апроксимувалась рівномірною горизонтальною розрахунковою сіткою з просторовим кроком 1000 м. Просторовий розподіл глибин та берегова лінія задавались на основі інформації ФДУ «Одеський район Держгідрографії».



**Рис. 1** – Батиметрична карта розрахункової області гідродинамічної моделі (глибини в м) з осями розміченими в номерах розрахункових вузлів (просторовий крок сітки дорівнює 1 км)

Прогнозування відгінно-нагінних коливань рівня моря виконувалось із використанням прогнозу просторово-часової мінливості вітрових умов (на 10 діб з часовою дискретністю 3 год) над ПнЗЧМ, наданому за глобальною чисельною моделлю прогнозу погоди GFS, веб-сервіс якої (National Operational Model Archive and Distribution System – NOMADS) знаходиться в США [10]. Просторова деталізація прогностичних даних моделі GFS у горизонтальній площині становить  $0,25^\circ$  за широтою та довготою.

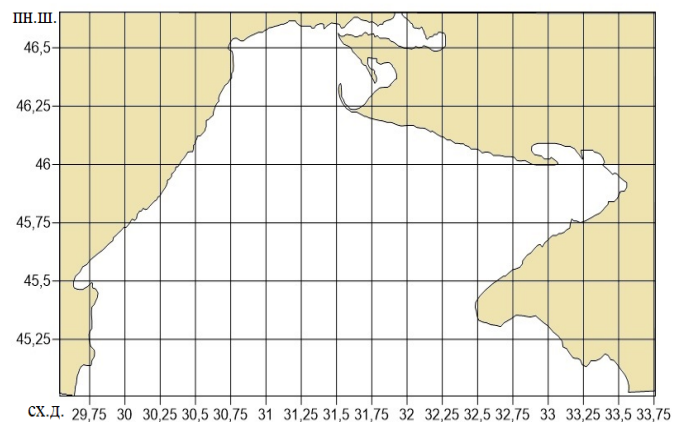
При прогнозуванні з різною завчасністю випадків значних ( $> 30$  см) відгінно-нагінних коливань рівня моря, спостережених в портах Одеського району ПнЗЧМ, використовувались дані прогнозів щодо мінливості вітрових умов в осінньо-зимовий період 2016, 2017 рр. взяті з архіву GFS-прогнозів [11], а також дані поточних GFS-прогнозів [12] вироблених у січні-лютому 2020 р.

Для відтворення гідродинамічною моделлю передісторії прогнозу викликаних вітром денівеляцій рівня моря та адаптації моделі до вхідних метеоданих, які передують даті прогнозу, зчитування даних з архіву GFS-прогнозів здійсню-

валось за процедурою, яка максимально наближала їх до ре-аналізу вітрових умов з просторовим розділенням  $0,25^\circ$  за широтою і довготою. Ця процедура полягала у наступному. Модель GFS запускається чотири рази на добу – в 00:00, 6.00, 12:00 і 18:00 годин UTC. Кожен раз при запуску модель генерує прогностичні поля метеорологічних величин з 3-х годинною часовою дискретністю на період від 0 до 240 год. В кожен з цих основних термінів запуску моделі GFS (4 рази на добу), протягом заданого періоду, який передуює даті вироблення прогнозу (3-5 діб), з архіву GFS-прогнозів [11] зчитувався прогноз тільки на найближчі 6 годин. Далі, для вироблення прогнозу на наступні прогностичні 10 діб, зчитувались суто прогностичні дані [12] з інтервалом у часі 3 години і з просторовим розділенням координатної сітки  $0,25$  градусів за широтою та довготою.

Валідація моделі у прогностичному режимі виконувалась шляхом порівняння значень денівеляцій рівня моря, прогнозованих з різною завчасністю із використанням моделі та визначених з даних спостережень в період розвитку явища значних штормових нагонів або відгонів на морських гідрометеорологічних станціях (МГС) Гідрометцентру Чорного та Азовського морів «порт-Одеса» (код станції 98013), «Чорноморськ» (код станції 98008), «порт Південний» (код станції 980091).

Для перенесення полів компонент вектору швидкості вітру, представлених у вузлах сітки GFS моделі (рис. 2), на більш дрібну розрахункову сітку гідродинамічної моделі (рис. 1) з просторовою роздільною здатністю 1 км, виконувалась просторова інтерполяція за методом квадратичних (зворотних) зважених відстаней.



**Рис. 2** – Розташування вузлів сітки GFS моделі (з просторовою дискретністю  $0,25^\circ$  за широтою та довготою) в досліджуваній області

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати випробувального прогнозування окремих випадків значних відгінно-нагінних коливань рівня моря, для яких амплітуда денівеляцій рівня перевищує 30 см, в портах ПнЗЧМ в штормові періоди 2016 та 2017 рр. наведені на рис. 3, 4. Нульова доба відповідає добі вироблення прогнозу, а інші значення – номерам діб на які надається прогноз від дати його складання (завчасність прогнозу).

Уявлення про результати поточного прогнозування динаміки вітрових денівеляцій рівня моря в період 26.11.-14.12.2017 р. надає рис. 5.

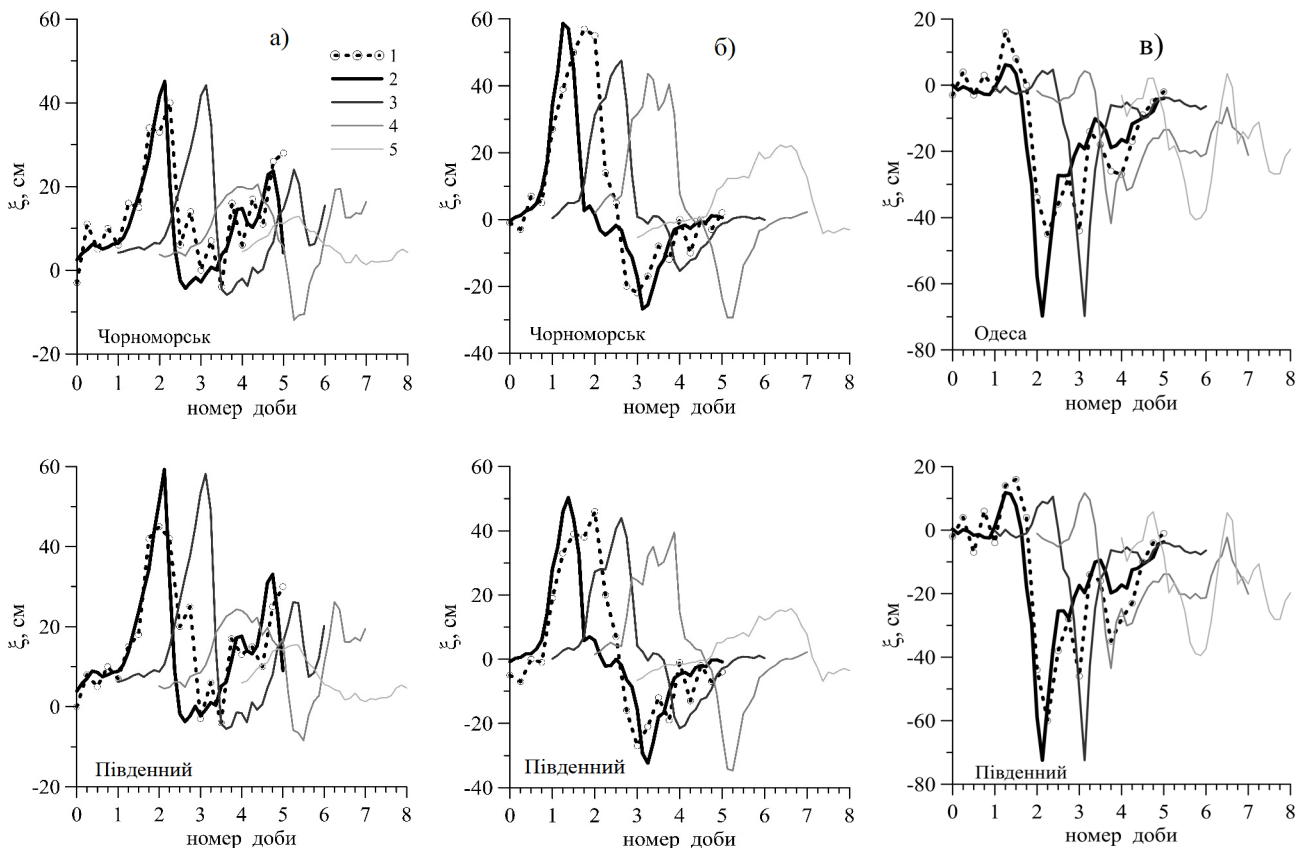
Додатково, у січні-лютому 2020 р. проводилось випробування гідродинамічної моделі із використанням даних поточних метеорологічних прогнозів мінливості вітрових умов над акваторією ПнЗЧМ за моделлю GFS в оперативному прогностичному режимі. Часова мінливість відміток рівня моря за даними спостережень у вказаний період в портах Одеського району наведена на рис. 6, а порівняння прогнозованих денівеляцій рівня моря зі спостереженими, в обрані штормові періоди, – на рис. 7. Від'ємні значення

діб на рис. 7 відповідають добам упередження прогнозу, в які вітрові умови зчитувались з архіву прогнозів, але за процедурою квазі ре-аналізу, описаною вище у розділі 2.

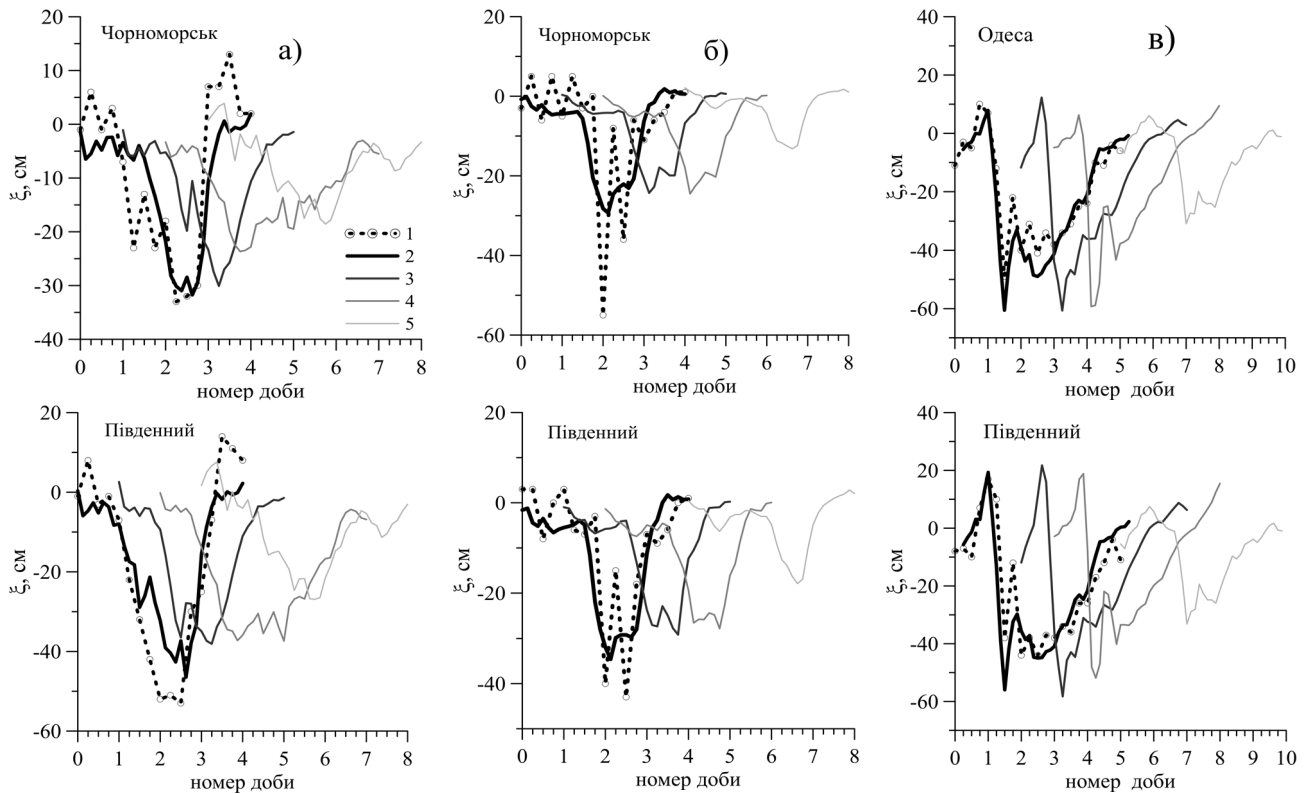
Аналіз наведених на рис. 3-5, 7 результатів прогнозування викликаних штормовими вітрами відгінно-нагінних коливань рівня моря дозволяє зробити наступні висновки.

Характер денівеляції рівня моря та її амплітуда, в переважній більшості розглянутих випадків, починають наближатися до спостережених при завчасності прогнозу не більше 4 діб. Це свідчить про те, що точність метеорологічного прогнозу за моделлю GFS з більшою завчасністю є недостатньою для прогнозування відгінно-нагінних коливань рівня моря викликаних штормовими вітрами.

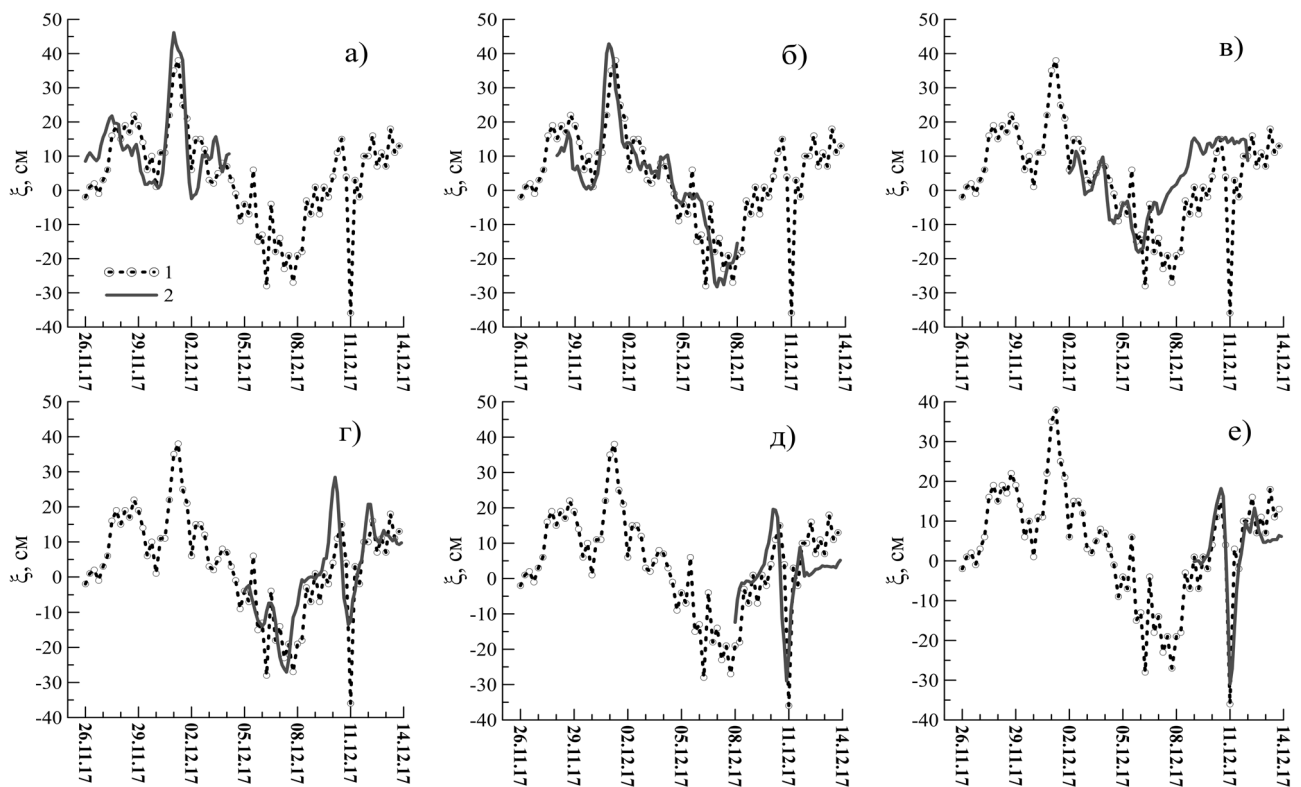
Зважаючи на те, що порти Одеського району розташовані досить близько один від одного на вигнутому узбережжі, то точність прогнозу викликаних вітром денівеляцій рівня моря, в кожному з них окремо, значною мірою визначається точністю метеорологічного прогнозу мінливості полів векторів вітру, причому, як за модулем, так і за напрямком. Наприклад, результати наведені на рис. 4б, де прогноз має задовільний збіг



**Рис. 3** – Викликані вітровою дією денівеляції рівня моря, в см, спостережені (крива 1) в портах ПнЗЧМ (а – 11.02.2016 р.; б – 13.10.2016 р.; в – 03.12.2016 р.) та отримані при прогнозуванні з різною завчасністю (криві: 2 – за 1,5-2 доби до спостереженого явища, 3 – за 3 доби, 4 – за 4 доби, 5 – за 6 діб)

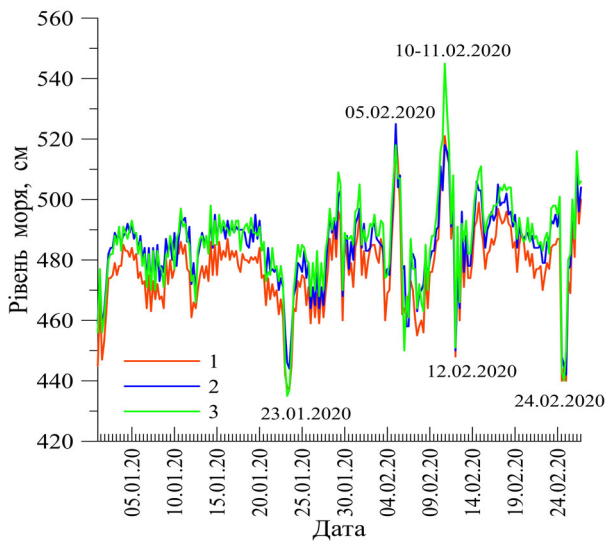


**Рис. 4** – Викликані ві트로ю дією денівеляції рівня моря, спостережені (крива 1) в портах ПнЗЧМ (а – 07.01.2017 р.; б – 15.02.2017 р.; в – 30.10.2017 р.) та отримані при прогнозуванні з різною завчасністю (криві: 2 – за 1,5-2 доби до спостереженого явища, 3 – за 3 доби, 4 – за 4 доби, 5 – за 6 діб)



**Рис. 5** – Результати поточного короткострокового прогнозування викликаних вітром денівеляцій рівня моря в порту Чорноморськ, в см, в період 26.11.-14.12.2017 р.: 1 – за даними спостережень; 2 – прогнозовані в дати: 26.11.2017; 28.11.2017; 02.12.2017; 05.12.2017; 08.11.2017; 09.11.2017 р.

зі спостереженнями для МГС «порт Південний» і незадовільний – для МГС «Чорноморськ», свідчить саме про неточність прогнозованого напрямку вітру. Окрім того, слід зважати на те, що математична структура гідродинамічної моделі, в рівняннях динаміки (1), (2) якої відсутні коефіцієнти горизонтального турбулентного обміну імпульсом, обумовлює її високу чутливість до похибок у визначенні вітрових умов. Модель практично без затримки у часі реагує на зміни вітру за напрямком і швидкістю.



**Рис. 6** – Мінливість відміток рівня моря в портах Одеса (1), Чорноморськ (2), Південний (3) в січні-лютому 2020 р. за даними спостережень. Вказані дати розвитку значних відгінно-нагінних коливань рівня моря, які прогнозувались

Зсуви у часі фаз розвитку відгінно-нагінних явищ, які проявляються у деякій завчасності або запізненні розвитку фаз підйому або зниження рівня моря, порівняно зі спостереженими (наприклад, рис. 3б, 4а), викликані наявністю таких зсувів у прогнозних даних мінливості вітрових умов, отриманих за атмосферою моделлю GFS, та вказаними вище особливостями математичної структури гідродинамічної моделі.

Вочевидь, що свій внесок в похибку, при розрахунках викликаних штормовими вітрами денівеляцій рівня моря, дає відносно груба просторова роздільна здатність метеорологічних прогнозів за моделлю GFS, через що зміна шорсткості підстильної поверхні на межі суша-море в метеорологічному прогнозі відбувається на масштабі  $\approx 25$  км, а не 3-7 км, як це дають мезомасштабні атмосферні моделі високої роздільної здатності WRF або Harmonie [13]. Зокрема, це

може призводити до завищення швидкості вітру, який спрямований з суші у бік моря, та, відповідно, амплітуди розрахованого відгону (як, наприклад, на рис. 3в, 7б, г).

З метою отримання кількісних оцінок точності прогнозу амплітуди розглянутих явищ значних нагонів і відгонів в портах (13 випадків в п.Південний, 12 – в п.Чорноморськ та 11 – в порту Одеса, оскільки в рядах спостережень за рівнем моря у відповідні проміжки часу були пропуски), для прогнозів із завчасністю  $\approx 2$  доби були розраховані середня абсолютна помилка прогнозу амплітуди  $\bar{\Delta}_{abc}$  та середня відносна помилка прогнозу амплітуди  $\bar{\Delta}_{\%}$ :

$$\bar{\Delta}_{abc} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\xi_{\phi}^{\max} - \xi_{np}^{\max}|;$$

$$\bar{\Delta}_{\%} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\xi_{\phi}^{\max} - \xi_{np}^{\max}|}{|\xi_{\phi}^{\max}|} \times 100,$$

де  $\xi_{np}^{\max}, \xi_{\phi}^{\max}$  – амплітуда денівеляції рівня

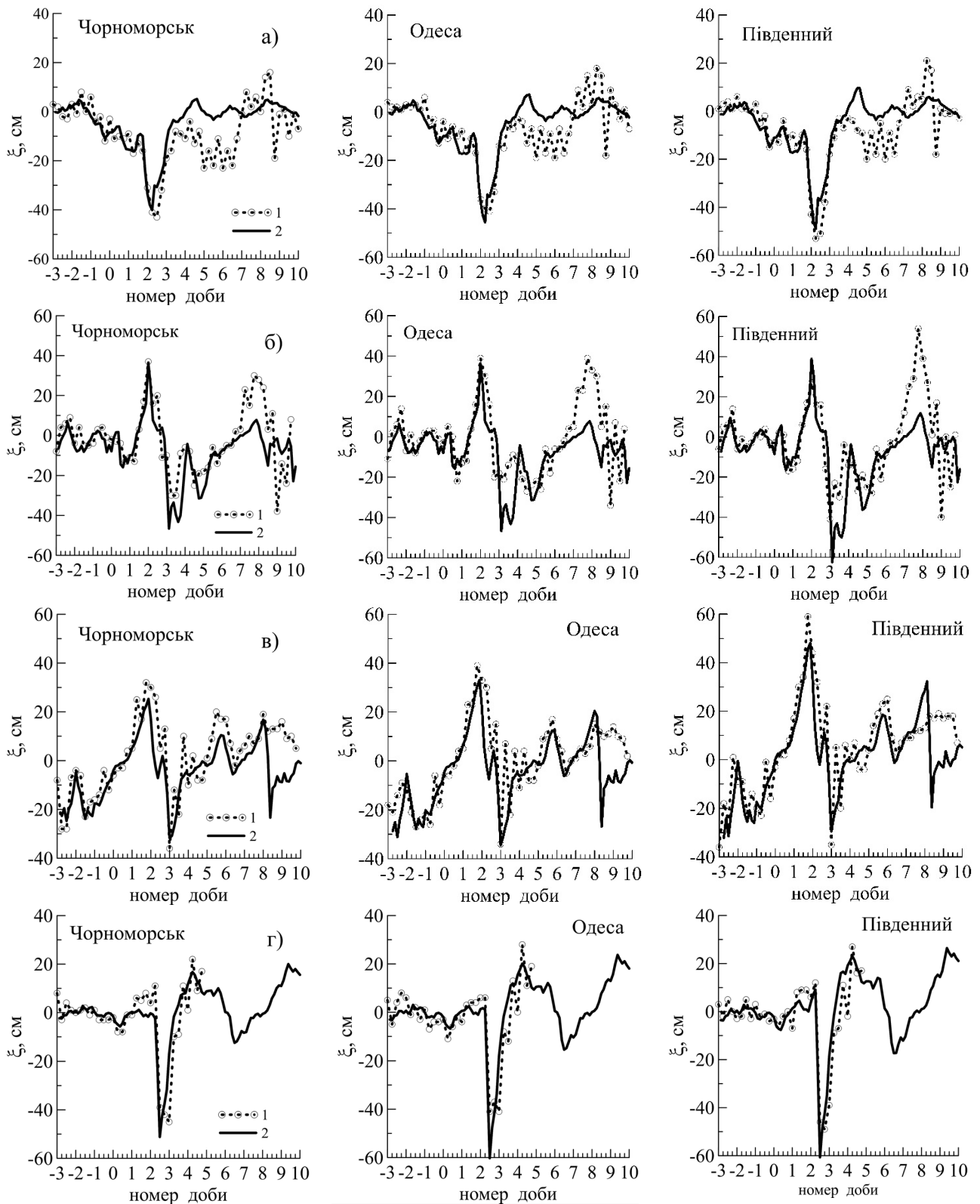
моря у розглянутих випадках за даними спостережень та прогнозу із завчасністю  $\approx 2$  доби,  $N$  – кількість випадків значних відгінно-нагінних денівеляцій рівня моря, які аналізувались, в кожному з портів.

За результатами розрахунків встановлено, що для портів ПнЗЧМ середня абсолютна помилка прогнозу амплітуди складала 7-8 см, а середня відносна – 15,9-18,5%. Нижні граничні значення помилок прогнозу, з вказаних діапазонів, отримані для п. Одеса, а верхні – для п. Південний.

З усієї сукупності проаналізованих в роботі прогнозів значних, з амплітудою денівеляцій до 65 см, відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах ПнЗЧМ, лише в двох випадках (по 1 – для п. Одеса і п. Чорноморськ, рис. 3в, 4б) помилка прогнозу амплітуди перевищила визначене в [5] допустиме її значення 15 см. З урахуванням вказаних вище оцінок значень середніх абсолютної та відносної помилок прогнозу, можна зробити припущення, що модель попередньо має добрі перспективи щодо її застосування для оперативного прогнозування викликаних штормовими вітрами відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Одеського району ПнЗЧМ. Однак остаточні висновки можуть бути зроблені тільки

після довготривалого випробувального використання моделі в оперативній прогностичній практиці Гідрометцентру Чорного та Азовського морів і статистично обґрунтованої оцінки якості

прогнозів відгінно-нагінних коливань рівня моря, згідно настанови [14], із використанням рядів з більшою кількістю випадків.



**Рис. 7** – Викликані вітровою дією значні денівеляції рівня моря, см, спостережені (1) в портах Чорноморськ, Одеса, Південний (див. рис. 6) та отримані при оперативному прогнозуванні (2) із використанням 2-D гідродинамічної моделі в такі дати вироблення прогнозу (0 доба): а) 21.01.2020; б) 03.02.2020; в) 09.02.2020; г) 22.02.2020 р.

#### 4. ВИСНОВКИ

Результати випробувань спрощеної 2-D гідродинамічної моделі у прогностичному режимі, із використанням даних синоптичного прогнозу мінливості вітрових умов над акваторією північно-західної частини Чорного моря отриманих за глобальною атмосферною моделлю GFS, свідчать про можливість її застосування для прогнозування викликаних штормовими вітрами значних відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Чорноморськ, Одеса, Південний із завчасністю до 4 діб.

Отримана прийнятна відповідність прогнозованих із завчасністю 1-3 доби і спостережених значень денівеляцій рівня моря. Зокрема, при завчасності прогнозу  $\approx 2$  доби, середня абсолютна помилка прогнозу амплітуди денівеляцій складала 7-8 см при допустимому її значенні 15 см, а середня відносна помилка прогнозу амплітуди – 15,9-18,5%.

Моделний комплекс переданий для випробувального використання в Гідрометцентр Чорного та Азовського морів Державної служби з надзвичайних ситуацій України. Перевагою застосування 2-D гідродинамічної моделі в оперативній прогностичній практиці Гідрометцентру Чорного та Азовського морів, на даному етапі розбудови національної системи морських прогнозів, є її невибагливість до наявних комп'ютерних ресурсів.

Спрощена математична структура моделі обумовлює її високу чутливість до точності метеорологічного прогнозу вітру, від якого значною мірою залежить якість прогнозу розвитку відгінно-нагінних коливань рівня моря. Точність прогнозу останніх, із використанням 2-D гідродинамічної моделі, може бути підвищена у разі застосування мезомасштабних метеорологічних моделей з високою просторовою роздільною здатністю, інтегрованих з глобальними атмосферними моделями прогнозу погоди – американського оперативного прогностичного комплексу GFS/WRF або європейського ARPEGE/IFS-Harmonie.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лонин С. А., Тучковенко Ю. С. Имитация сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западной части Черного моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : МГИ НАН Украины, 1999. С. 58-66.
2. Коморин В. Н., Тучковенко Ю. С. Использование численной гидродинамической модели для прогноза

сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западного шельфа Черного моря. *Метеорология, климатология та гідрологія*. 2002. № 46. С. 324-331.

3. Гаврилюк Р. В., Ювченко Н. М. Згінно-нагінні коливання рівня моря в портах Южний і Чорноморськ та оцінка можливості їх прогнозування. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 100-106. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.09>
4. Кушнір Д. В., Тучковенко Ю. С., Попов Ю. И. Результаты адаптации та верификації комплексу інтегрованих чисельних моделей для прогнозування мінливості океанографічних характеристик в північно-східній частині Чорного моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 23. С. 95-108. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.09>
5. Тучковенко Ю. С. Імітаційне моделювання відгінно-нагінних коливань рівня моря в портах Одеського району північно-західної частини Чорного моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 23. С. 109-120. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.10>
6. NOAA. GFS Global Forecast System. URL: [https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical\\_forecast\\_systems/gfs.php](https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php) (дата звернення 07.03.2020).
7. Вольцингер Н. Е., Пясковский Р. В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы : монография. Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. 207 с.
8. Герман В. Х., Левиков С. П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря: монография. Ленинград : Гидрометеиздат, 1988. 231 с.
9. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря : монография / Блатов А. С., Булгаков Н. П., Иванов В. А. и др. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
10. NOAA, National Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS). URL: <https://nomads.ncep.noaa.gov/> (дата звернення 07.03.2020).
11. NCAR. Research Data Archive at the Computational and Information Systems Laboratory. *NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive*. URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (дата звернення 25.11.2019).
12. NOMADS. Data Transfer: NCEP GFS Forecasts (0.25 degree grid). URL: [http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter\\_gfs\\_0p25.pl](http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter_gfs_0p25.pl) (дата звернення 25.11.2019).
13. Иванов С. В., Рубан И. Г., Тучковенко Ю. С. Преимущества использования атмосферной мезомасштабной модели Harmonie для воспроизведения динамики вод в прибрежных районах моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 107-114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.10>
14. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. Росгидромет, 2011, 193 с.

#### REFERENCES

1. Lonin, S.A. & Tuchkovenko, Yu.S. (1999). Imitatsiya sgonno-nagonykh kolebaniy urovnya morya v portakh severo-zapadnoy chasti Chernogo morya [Simulation of the inflow-outflow oscillations of the sea water level in the ports of the North-Western part of the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon*

- i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shelf'a [Environmental safety of coastal and shelf zone and integrated usage of shelf resources].* Sevastopol: Marine Hydrophysical Institute of NASU, pp. 58-66. (in Russ.)
2. Komorin, V.N. & Tuchkovenko, Yu.S. (2002). Ispol'zovanie chislennoy gidrodinamicheskoy modeli dlya prognoza sgonno-nagonnnykh kolebaniy urovnya morya v portakh severo-zapadnogo shelf'a Chernogo morya [The Use of a Numerical Hydrodynamic Model for Forecasting Wind Fluctuations of the Sea Level at the Ports in the North-Western Shelf of the Black Sea]. *Meteorologiya, klimatologiya ta hidrolohiia [Meteorology, Climatology and Hydrology]*, 46, pp. 324-331. (in Russ.)
3. Gavriluk, R.V. & Yuvchenko, N.M. (2018). Wind-induced sea level fluctuations at Yuzhnyi and Chornomorsk sea ports and evaluation of the possibility of their forecast. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 22, pp. 100-106. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.09> (in Ukr)
4. Kushnir, D.V., Tuchkovenko, Yu.S. & Popov, Yu.I. (2019). Results of adaptation and verification of the coupled numerical models set for predicting the variation of oceanographic features in the North-Western part of the Black Sea. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 23, pp. 95-108. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.09> (in Ukr)
5. Tuchkovenko, Y.S. (2019). Simulation modelling of wind-induced sea level fluctuations at the ports of the Odesa Region in the North-Western part of the Black Sea. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 23, pp. 109-120. <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.10> (in Ukr)
6. NOAA. GFS Global Forecast System. Available at: [https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical\\_forecast\\_systems/gfs.php](https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php) (Accessed: 07.03.2020).
7. Volcinger, R.V. & Piskovskii, R.V. (1977). *Teoriya melkoy vody. Okeanologicheskie zadachi i chislennyye metody [The shallow-water theory. Oceanological Problems and Numerical Methods]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
8. German, V.Kh. & Levikov, S.P. (1988). *Veroyatnostnyy analiz i modelirovanie kolebaniy urovnya morya [Probability Analysis and Simulation of Oscillations of the Sea Level]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
9. Blatov, A.S., Bulgakov, N.P., Ivanov, V.A. et al. (1984). *Izmenchivost' gidrofizicheskikh poley Chernogo morya [Variability of Hydrophysical Fields of the Black Sea]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
10. NOAA. National Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS). Available at: <https://nomads.ncep.noaa.gov/> (Accessed: 07.03.2020).
11. NCAR. Research Data Archive at the Computational and Information Systems Laboratory. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Available at: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/> (Accessed: 25.11.2019).
12. NOMADS. Data Transfer: NCEP GFS Forecasts (0.25 degree grid). Available at: [http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter\\_gfs\\_0p25.pl](http://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter_gfs_0p25.pl). (Accessed: 25.11.2019).
13. Ivanov, S.V., Ruban, I.G. & Tuchkovenko, Y.S. (2018). Advantages of using the Harmonie atmospheric mesoscale model for simulating water dynamics in offshore area. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 22, pp. 107-114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.10>
14. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov [Guidance for the Forecasting Service]*. Section 3, Part 3: *Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov [The Service for Marine Hydrological Forecasts]*. (2011). Russian Hydrometeorological Service. (in Russ.)

## FORECASTING SEA LEVEL FLUCTUATIONS CAUSED BY STORM WINDS AT THE PORTS IN ODESA REGION OF THE NORTH-WESTERN PART OF THE BLACK SEA

Yu. S. Tuchkovenko<sup>1</sup>, O. S. Matygin<sup>2</sup>, V. Yu. Chepurna<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Odessa State Environmental University, 15 Lvivska Str., Odessa, 65016, Ukraine, [tuch2001@ukr.net](mailto:tuch2001@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

<sup>2</sup> Hydrometeorological Center for Black and Azov Seas, 89 Frantsuzskiy Boulevard, Odessa, 65009, Ukraine [pgdgmccam@meteo.gov.ua](mailto:pgdgmccam@meteo.gov.ua)

Increasing the draught of ships that may be accepted by ports for loading at their loading berths is one of the main tasks aimed at development and freight turnover enhancement of sea trade ports located in Odesa Region of the north-western part of the Black Sea (cities of Chornomorsk, Odesa and Pivdennyi). An operational forecasting of short-term sea level fluctuations caused by storm winds presents a critical task for ensuring safe navigation across the ports' water area and approach channels. The article is devoted to analysing and discussing the results of tests of a simplified 2D hydrodynamic model designed for forecasting such phenomena as upsurge and downsurge of the sea level caused by storm winds in the vicinity of sea ports in Odesa Region of the north-western part of the Black Sea. Spatio-temporal variability of wind conditions at the sea-to-atmosphere boundary was set based on the data retrieved from a 10-day synoptic forecast using global atmospheric prediction model GFS (Global Forecast System). The study analyses the results of forecast of significant (the ones exceeding 30 cm) short-term sea level drops and rises at the ports which were observed in 2016, 2017 and 2020.

It was established that, in case of use of the GFS forecast data, the pattern of sea level denivelations caused by storm winds and their amplitude in the majority of events start approximating to the observed values provided the forecast has a 4-day lead time. Therefore the

accuracy of wind conditions variability forecast with application of the GFS model having a longer lead advance time is not sufficient for forecasting the sea level fluctuations caused by storm winds. The study made it possible to get an acceptable equivalence between the values of sea level denivellation amplitudes which were forecast with a 1-to-3-day lead time and the ones observed afterwards. In particular, when the forecast lead time is equal to  $\approx 2$  days, in relation to the expected storm conditions, the average absolute error for the forecast of sea level fluctuations amplitude constituted 7-8 cm, while its permissible value was defined as 15 cm, and the average relative error – 16-18%. It allowed making a conclusion that a hydrodynamic model option, applied alongside with the forecasting information on wind conditions variability retrieved with the help of the GFS weather prediction model, may be used for operational forecasting of short-term sea level fluctuations caused by storm winds with the forecast lead time of up to 4 days.

Keywords: north-western part of the Black Sea; ports; sea level storm fluctuations; forecasting

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШТОРМОВЫХ СГОННО-НАГОННЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ В ПОРТАХ ОДЕССКОГО РАЙОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Ю. С. Тучковенко<sup>1</sup>, А. С. Матыгин<sup>2</sup>, В. Ю. Чепурна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [tuch2001@ukr.net](mailto:tuch2001@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>

<sup>2</sup> Гидрометцентр Черного и Азовского морей, Французский бульвар, 89, 65009, Одесса, Украина, [pgdgmccham@meteo.gov.ua](mailto:pgdgmccham@meteo.gov.ua)

Увеличение осадки судов, которые может принять порт для загрузки у причалов, является одним из основных направлений развития и повышения грузооборота морских торговых портов Одесского района северо-западной части Черного моря (Черноморск, Одесса, Южный). Для обеспечения безопасности судоходства в акватории портов и на подходных каналах к ним, актуальной задачей является оперативное прогнозирование вызванных штормовыми ветрами краткосрочных колебаний уровня моря. Статья посвящена анализу и обсуждению результатов испытания упрощенной 2-D гидродинамической модели для прогнозирования вызванных штормовыми ветрами сгонно-нагонных колебаний уровня моря в районах морских портов Одесского района северо-западной части Черного моря. Пространственно-временная изменчивость ветровых условий на границе раздела «море-атмосфера» задавалась на основе данных синоптического прогноза на 10 суток с использованием глобальной атмосферной модели GFS (Global Forecast System). Анализировались результаты прогноза значительных (больше 30 см) кратковременных снижений и повышений уровня моря в портах, которые наблюдались в 2016, 2017 и 2020 гг.

Установлено, что при использовании данных GFS-прогноза характер вызванных штормовыми ветрами денивеляций уровня моря и их амплитуда, в преобладающем числе случаев, начинают приближаться к наблюдаемым значениям при заблаговременности прогноза не более 4 суток. То есть точность прогноза изменчивости ветровых условий по модели GFS с большей заблаговременностью недостаточна для прогнозирования вызванных штормовыми ветрами колебаний уровня моря. Получено приемлемое соответствие между прогнозируемыми с заблаговременностью 1-3 суток и наблюдаемыми значениями амплитуд денивеляций уровня моря. В частности, при заблаговременности прогноза  $\approx 2$  суток, для рассмотренных штормовых случаев средняя абсолютная ошибка прогноза амплитуды колебаний уровня составила 7-8 см, при допустимом ее значении 15 см, а средняя относительная – 16-18%. Сделан вывод о том, что гидродинамическая модель, в варианте с использованием прогностической информации об изменчивости ветровых условий, получаемая с помощью модели прогноза погоды GFS, может применяться для оперативного прогноза вызванных штормовым ветром колебаний уровня моря с заблаговременностью до 4 суток.

**Ключевые слова:** северо-западная часть Черного моря; порты; штормовые колебания уровня моря; прогнозирование

Подання до редакції : 25. 03. 2020  
Надходження остаточної версії : 22. 04. 2020  
Публікація статті : 03. 07. 2020

УДК 504.064.4

## СУЧАСНИЙ СТАН ТА МОЖЛИВОСТІ ПОВОДЖЕННЯ З ВЕЛИКОГАБАРИТНИМИ МУНІЦИПАЛЬНИМИ ВІДХОДАМИ В РЕГІОНАХ УКРАЇНИ

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

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [safranov@ukr.net](mailto:safranov@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0003-0928-5121>

В процесі життєдіяльності людини утворюються тверді муніципальні відходи (ТМВ), які складаються із твердих побутових відходів (відходів житлового фонду), відходів комерційних організацій, відходів громадських установ і організацій, відходів промислових підприємств, відходів обслуговування та благоустрою міст. Загальною ознакою для усіх цих видів відходів є те, що організація, управління і відповідальність за утилізацію належить міській владі – муніципалітетам. Утворюються такі відходи в побуті, у мережі харчування, при проведенні будівельно-ремонтних робіт, у муніципальних системах транспорту, зв'язку тощо. Метою роботи є оцінка сучасного стану та можливостей поводження з великогабаритними муніципальними відходами в регіонах України. Для досягнення цієї мети проаналізовані існуючі нормативно-законодавчі документи та досвід в сфері поводження з великогабаритними муніципальними відходами. Робота ґрунтується на аналізі опублікованих даних, а також на матеріалах власних досліджень. Реалізація системи поводження з ТМВ передбачає створення муніципального центру утилізації вторинних матеріальних ресурсів на основі модульно-поквартального принципу. Основним структурним елементом центру утилізації повинен стати пункт рециклінга з обов'язковим модулем прийому та розбирання великогабаритних відходів. Крім того, пропонується створення окремих майданчиків для збору великогабаритних відходів, що вже реалізується в деяких містах України. При диференціації потоків ТМВ не приділяється належної уваги відпрацьованим автомобілям, які умовно можна віднести до великогабаритних вторинних матеріальних ресурсів. Діючі утилізаційні центри в Україні не відповідають сучасним вимогам. Через відсутність необхідного досвіду в галузі поводження з відпрацьованими автомобілями, слід звернутися до зарубіжного досвіду і орієнтуватися на вимоги розвинених країн. Відповідно до міжнародних норм термін експлуатації легкового автомобіля становить 10 років, з наступною утилізацією відповідним чином, щоб він не чинив негативного впливу на стан довкілля. Оскільки на цей час в Україні 27 % автомобілів старші 30 років, то при необхідності обов'язкової утилізації їх кількість буде складати приблизно 2,5 млн. одиниць. При такій кількості відпрацьованих автомобілів на кожен область України припадатиме 100 тис. автомобілів, які вимагатимуть утилізації. Навряд чи можливе буде створення центрів утилізації у кожній області, але на першому етапі доцільна організація таких центрів, наприклад, у кожному економічному районі або кластері. Створення системи поводження з великогабаритними муніципальними відходами в регіонах України дозволить перетворювати їх в корисну продукцію, знизити рівень негативного впливу на довкілля і отримати не тільки екологічний, але і соціально-економічний ефект.

**Ключові слова:** тверді муніципальні відходи, великогабаритні відходи, відпрацьовані автомобілі, утилізація, рециклінг.

### 1. ВСТУП

Санітарно-екологічний стан на урбанізованих територіях залежить від багатьох факторів, серед яких особливе значення має ефективність системи управління та поводження з твердими

муніципальними відходами (*Municipal Solid Waste*) або відходами міських систем, які утворюються в процесі життєдіяльності людини. Цей термін широко використовується в європейських країнах, очевидно, через те, що поводження з ними було обов'язком місцевих органів влади –

муніципалітетів. Тверді муніципальні відходи (ТМВ) складають: тверді побутові відходи або відходи житлового фонду (*residential*); відходи комерційних організацій (*commercial*); відходи громадських установ і організацій (*institutional*); відходи промислових підприємств (*industrial*); відходи містообслуговування та благоустрою (*municipal*) [1]. Загальною ознакою для усіх цих видів відходів, окрім розміщення джерел утворення, є те, що організація, управління і відповідальність за утилізацію належить міській владі [2]. Таким чином, поняття «тверді муніципальні відходи» ширше, аніж «тверді побутові відходи» (ТПВ), хоча часто ці терміни використовуються як синоніми.

Міжнародними документами, зокрема, Програмою ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП) та Організацією економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР), наводиться таке визначення муніципальних відходів: відходи, що збираються муніципалітетами або за їх дорученням із залученням приватних або державних служб, включаючи відходи, генеровані домашніми господарствами, комерційними і торговими підприємствами, малим бізнесом, конторськими і іншими установами (школами, лікарнями, державними установами). До них також відносяться великогабаритні відходи (наприклад, предмети домашнього ужитку, старі меблі, матраци) і відходи окремих муніципальних служб, зокрема сміття, що збирається в садово-паркових зонах і на вулицях (вуличне сміття, вміст сміттєвих урн, сміття в місцях ринкової торгівлі), якщо воно класифікується як відходи. Це визначення не поширюється на відходи муніципальної каналізаційної мережі та її очисних споруд, муніципального будівництва і зносу будівель [3].

В оприлюдненому проекті Закону України «Про управління відходами» [4] до складу муніципальних відходів входять: а) побутові відходи – відходи від домогосподарств, включаючи папір, картон, скло, метали, пластик, біовідходи, деревину, текстиль, упаковку, відходи електричного та електронного обладнання, відпрацьовані батарейки, батареї та акумулятори, а також *великогабаритні відходи*; відходи з інших джерел, якщо ці відходи подібні за своїм складом до відходів з домогосподарств; б) відходи інфраструктури населеного пункту – відходи об'єктів благоустрою населених пунктів (включаючи відходи від зелених насаджень); вуличний змет.

У «Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року» (схвалено

розпорядженням КМУ від 08.11.2017 р. за № 820-р) [5] виділяються: побутові відходи; промислові відходи; відходи будівельно-ремонтних робіт; небезпечні відходи; відходи виробництва сільського господарства; специфічні види відходів.

В «Правилах надання послуг з поводження з побутовими відходами» (Постанова КМУ «Про внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України» від 27 березня 2019 р. № 318) до складу побутових відходів віднесені: великогабаритні відходи; небезпечні відходи; ремонтні відходи.

Як бачимо, існують різні визначення ТМВ залежно від національної практики поводження з ними. Тобто критерієм віднесення відходу до ТМВ є не лише джерело утворення, а й особливості управління і поводження з ним. При існуючій системі поводження з ТМВ в Україні, за винятком, можливо, великих міст, поняття ТМВ і ТПВ практично тотожні. У разі наявності ефективної системи поводження з ТМВ, ТПВ виступають як частина загального їх потоку, що доповнюється і іншими видами відходів.

В рамках логістичного підходу складові ТМВ доцільно розглядати у вигляді наступних потоків відходів: органічні речовини, що легко розкладаються (харчова органіка; листя і вуличне сміття); інертні мінеральні великогабаритні відходи (будівельне сміття); 3) потенційні вторинні матеріальні ресурси: великогабаритні предмети домашнього споживання (старі меблі, відпрацьовані засоби пересування та непридатна для подальшої експлуатації побутова техніка тощо), відходи контейнерного збору (різноманітна тара і упаковка, макулатура, текстиль, метали, скло, шкіра, гума і тому подібне); небезпечні відходи (медичні відходи, ртутні лампи, батареї, акумулятори) [6, 7].

Згідно до Закону України «Про відходи» (частина статті 35-1 із змінами, внесеними згідно із Законом № 5456-VI від 16.10.2012 р.), великогабаритні та ремонтні відходи мають збиратися окремо від інших видів побутових відходів. Але контейнерні майданчики, зазвичай, заповнені десятками мішків будівельного сміття, поламаними меблями, старими холодильниками. Такі речі деформують контейнери та пошкоджують вартісні частини сміттєвозів, наприклад, пресувальну плиту. Окрім того, вони псують зовнішній вигляд прибудинкової території і завдають певних незручностей мешканцям. Тому обґрунтування системи поводження з великогабаритними муніципальними відходами є дуже актуальною проблемою.

У Постанову КМУ «Питання надання послуг з вивезення побутових відходів» від 16 листопада 2011 р. № 1173 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 318 від 27.03.2019) не увійшли мінімальні норми надання послуг з вивезення побутових відходів, що призвело до того, що великогабаритні та ремонтні відходи автоматично були виключені з зони обслуговування комунальних служб. Раніш для таких відходів облаштовувались спеціальні майданчики (поруч з контейнерними) для накопичення та подальшого вивезення їх комунальними службами. Вартість поводження з такими відходами включалась до вартості поводження з побутовими відходами на підставі мінімальних норм надання послуг з вивезення побутових відходів. Зараз турботу про поводження з великогабаритними та ремонтними відходами перекладають на плечі мешканців. В такому разі залишається незрозумілою юридична приналежність цих відходів.

*Метою роботи є оцінка сучасного стану та можливих шляхів поводження з великогабаритною складовою в потоці твердих муніципальних відходів в регіонах України.*

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методологічну основу роботи складає аналіз існуючої нормативно-законодавчої бази у сфері поводження з великогабаритної складової ТМВ та досвіду поводження з ними. Робота ґрунтується на опублікованих даних, а також на матеріалах власних досліджень.

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

До великогабаритних відносяться тверді відходи, розміри яких перевищують 50 x 50 x 50 см, що не дає змоги розмістити їх у контейнерах об'ємом до 1,1 м<sup>3</sup>. Утворюються такі відходи в побуті, у мережі харчування, при проведенні будівельно-ремонтних робіт, у муніципальних системах транспорту, зв'язку, водоканалу. Приклади відходів – відпрацьовані засоби пересування та їх складові (велосипеди, мотоцикли, автомашини, тролейбуси, трамваї, шини тощо), відпрацьоване обладнання системи харчування (холодильне і пічне), великогабаритні відпрацьовані запчастини, меблі, будівельні відходи тощо.

Потік потенційних вторинних матеріальних ресурсів (ВМР), що генерується в результаті життєдіяльності міського населення і господар-

ської діяльності об'єктів інфраструктури повинен поділятися на відповідні складові: а) великогабаритні відходи - старі меблі, побутова та ін. техніка (спрямовуються до спеціалізованих організацій для демонтажу з подальшою їх утилізацією); б) тара і упаковка, макулатура, текстиль, метали, скло, шкіра, гума (збираються в пересувні, марковані контейнери для кожного виду ВМР або в контейнери для змішаних потенційних ВМР і вивозяться для подальшої переробки); в) інертні мінеральні великогабаритні відходи, що утворюються при проведенні будівельних і ремонтних робіт в домашньому господарстві і на об'єктах міського підпорядкування [7].

Управління потоком потенційних ВМР має будуватися за принципом економічної доцільності в ланцюжку «виробник відходів» → «сортувальник відходів» → «переробник ВМР». Реалізація зазначеного принципу можлива, оскільки діяльність з роздільного збору відходів повинна матеріально стимулювати суб'єктів, що їх генерують, а компанії, які займаються вивезенням, переробкою та утилізацією ВМР, безпосередньо зацікавлені в отриманні більшої кількості добре відсортованих відходів.

Реалізація системи поводження з ТМВ передбачає створення муніципального центру утилізації ВМР на основі модульно-поквартального принципу. До складу центру доцільно включити координуючу адміністративну групу, склад-накопичувач ВМР і транспортний підрозділ. Основним структурним елементом центру утилізації повинен стати пункт рециклінга, розташований на місці одного з внутрішньоквартальних контейнерних майданчиків, який складається з 5 модулів: 1) модуль прийому відокремлених органічних відходів, які легко розкладаються; 2) модуль прийому та сортування стабілізованих потенційних ВМР; 3) модуль, що виконує функції пункту прийому вторинної сировини і здійснює прийом окремих фракцій потоку ТМВ, відсортованих населенням, за гроші; 4) модуль прийому та розбирання великогабаритних відходів; 5) модуль збору фракції небезпечних побутових відходів (рис.).

В містах України за вивезення великогабаритних відходів передбачена плата (наприклад, в Черкасах 13,2 грн. на місяць з кожного мешканця, в Сумах – 2,73 грн. на місяць з кожного мешканця, в Києві – 156,74 грн. за 1 тону, в Івано-Франківську – 415-540 грн. за 1 тону тощо). У Львові працюють майданчики для збору великогабаритних та дрібних будівельних відходів,

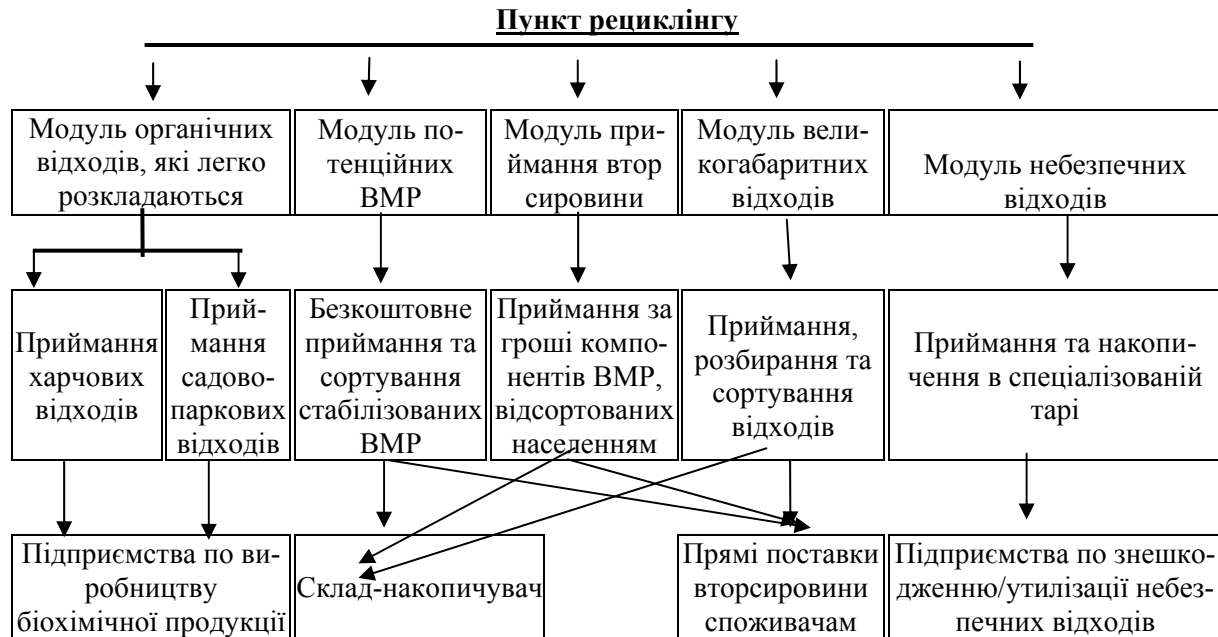


Рис. – Структура пункту рециклінгу

де жителі міста мають змогу безкоштовно здати старі меблі, вікна, двері, побутову техніку (холодильники, телевізори, пральні машини), шини, скло, папір, метал, а також дрібні будівельні відходи. Від однієї особи приймають: меблі, побутові прилади – не більше 1 (однієї) одиниці відходів в місяць (поштучно); дрібні будівельні відходи – не більше 1000 кг на місяць (насіпом); скло – не більше 20 кг на місяць; шини легкових автомобілів – 4 шт. один раз на рік. В Одесі у січні 2020 р. відкрито перший майданчик для збору великогабаритних відходів, а до кінця поточного року ще планується створення 6-7 майданчиків.

Доцільно навести приклади поводження з великогабаритними відходами у деяких країнах ЄС. Бельгійська система збору відходів побудована таким чином, щоб зробити відокремлення відходів максимально простим для людей. Існує три типи каналів збору: збір відходів, призначених для рециклінгу, в контейнери, розташовані обабіч вулиць, збір у муніципальних утилізаційних дворах та через роздрібних торговців. Типовими відходами, що збираються населенням, є змішані відходи, пластикові пляшки, металеві упаковки та коробки для напоїв, скляні пляшки, овочеві, фруктові та садові відходи, а також великогабаритні відходи. Вони викидаються у контейнери, розміщені на вулицях. Муніципальний утилізаційний двір – це ділянка землі, де громадяни можуть депонувати свої відходи окремо. Для кожної категорії

відходів передбачено відповідну ємність або контейнер. В Німеччині від великогабаритних відходів позбавляються за допомогою спеціальних фірм. З ними домовляються про дату і залишають непотрібні речі на вулиці перед будинком безпосередньо перед узгодженим часом. Деякі муніципалітети здійснюють збір такого сміття безкоштовно, деякі стягують плату (перший кубометр відходів обійдеться в середньому в €30-50, кожний наступний - в €5). Кількість великогабаритних відходів, що викидаються, обмежена і регулюється по-різному, в залежності від місця розташування. У багатьох містах існують спеціальні пункти збору, призначені для громіздких відходів. Свої варіанти пропонують центри утилізації або переробки. Іноді великогабаритні відходи (меблі, побутова техніка тощо) вивозять за графіком, приблизно один раз на три місяця. До цього моменту меблі і побутову техніку може забрати кожний, кому це потрібно. У кожному районі існує графік, за яким спеціальна бригада утилізаторів забирають старі холодильники, пральні машинки, меблі, металевий лом. Щоб здати якісь великогабаритні предмети, мешканцям треба заздалегідь, за тиждень або навіть місяць, сповістити про свої наміри по телефону утиль-конттору і заплатити за вивезення деяку суму. В Швеції великогабаритні відходи (побутову техніку, меблі, будівельні матеріали тощо) безкоштовно здають в спеціальні пункти прийому, розташовані у відносній доступності.

При диференціації потоків ТМВ не приділяється належної уваги відпрацьованим автотранспортним засобам (АТЗ), які умовно можна віднести до великогабаритної складової вторинних матеріальних ресурсів, але їх окремі складові (акумулятори, батареї та ін.) відносяться до небезпечних відходів.

У «Методичних рекомендаціях з розроблення регіональних планів управління відходами» (затверджені Наказом Міністерства екології та природних ресурсів України від 12.04.2019 р. за №142) [8] виділяються муніципальні відходи (окремо побутові відходи; відходи інфраструктури населених пунктів). Крім того, в цьому документі окремо виділені «зняті з експлуатації транспортні засоби», але до їх складу можуть виходити «відпрацьовані нафтопродукти; відходи електричного та електронного обладнання; відпрацьовані батареї, батареї та акумулятори» тощо.

Відходи утворюються на всіх етапах життєвого циклу АТЗ – під час їх виробництва, експлуатації, технічного обслуговування та виведення з експлуатації. Після закінчення терміну експлуатації самі АТЗ стають відходом – це корпус та інші частини АТЗ, небезпечні матеріали, що входять до складу (важкі метали, пластикові частини, гумові вироби, нафтопродукти та інші). Слід зазначити, що частини АТЗ (акумулятори, шини, скло і т. д.) мають значно менший термін експлуатації ніж сам АТЗ і при виході з ладу являють собою небезпечні для довкілля речовини.

Останнім часом утилізації АТЗ, які відпрацьовали свій строк, приділяється особлива увага, що пояснюється її актуальністю на сьогоднішній день не тільки в Україні, але і у всіх країнах світу. Нагадаємо, що утилізація АТЗ передбачає їх використання як ВМР, а рециклінг АТЗ – це безпосередньо сам процес вилучення комплектуючих та вузлів, які можна використовувати повторно. Утилізація і рециклінг АТЗ має певні вимоги і положення, значна частина яких поширюється на виробників автомобілів. Зокрема, виробники АТЗ повинні виконувати встановлені обмеження щодо використання токсичних забруднюючих речовин (ЗР), а також надавати спеціальні каталоги з рециклінгу, керівництва зі зливання технічних рідин і демонтажу компонентів автомобілів, які відпрацьовали свій строк.

Відпрацьовані АТЗ містять велику кількість відходів. При обслуговуванні і утилізації АТЗ щороку в світі утворюється 15,6 млн. т відходів (у т. ч. пластмаси – 3,8 млн. т; шини – 1,3 млн. т; інші неметалеві матеріали – 4,4 млн. т; робочі рідини – 0,8 млн. т; матеріали, які одержані при ремонті і технічному обслуговуванні АТЗ –

4,4 млн. т) [9].

За даними статистики, щороку в Україні з експлуатації виводиться від 100 до 200 тисяч автомобілів. На сьогодні утилізації підлягає вже понад 1 млн. автомобілів, не придатних для експлуатації. Впровадження концепції утилізації таких автомобілів дасть можливість переробити їх, не завдаючи шкоди навколишньому середовищу. В середньому термін експлуатації легкового автомобіля складає 10-15 років, проте в нашій країні цей показник досягає більшого терміну. У результаті роботи, а також фізичних і хімічних процесів, що відбуваються в автомобілі, його вузли і механізми поступово зношуються, технічний стан погіршується, і як наслідок – збільшується кількість ЗР, які потрапляють в атмосферу при експлуатації авто. З урахуванням того, що основним джерелом забруднення повітряного басейну більшості міст України є автомобільний транспорт, посилення вимог до його технічного стану буде сприятиме поліпшенню екологічного стану урбанізованих територій.

На 1 тисячу жителів України припадає 202 автомобіля (для порівняння на 1 тисячу жителів Сан-Маріно – 1263, Монако – 869, США – 797, Бангладеш, Того – по 2 автомобіля). Зауважимо, що в Україні навіть найстаріші автомобілі частково здають на запасні частини, частково – на металобрухт або викидають на смітник, а з шин іноді роблять клумби, тренажери або огорожі на дитячих майданчиках. У містах непоодинокі випадки, коли у дворах на газонах багатопверхівок припарковано старі покинуті АТЗ. Вони псують ландшафт, завдають фізичне та хімічне забруднення навколишньому середовищу, і, безперечно, погіршують якість візуального середовища.

В Україні намагалися ввести систему переробки старих машин. У 2013 р. набув чинності Закон України «Про утилізацію транспортних засобів» [10], який визначав правові, організаційні та економічні засади діяльності, пов'язаної з утилізацією транспортних засобів. Згідно цього закону в Україні повинна була з'явитися мережа утилізаційних центрів. Планувалося, що держава відшкодуватиме вартість утилізації підприємствам і для цього на всі нові автомобілі ввели утилізаційний збір. Але вже у 2015 р. новий податок скасували через тиск автомобілістів і бізнесу, а система так і не запрацювала, хоча ліцензію на утилізацію відпрацьованих АТЗ отримало понад 280 підприємств. Крім того, в цьому законі не було вказано, які машини підлягають утилізації, а також не було прописано ні вимог до віку транс-

порту, ні до його технічного стану. Вийшло, що утилізація – добровільна справа. Тому українці не кинулися здавати свої автомобілі на переробку. А мережа утилізаційних підприємств так і не з'явилася. Для передачі відпрацьованого АТЗ в утиль потрібно попередньо зняти його з обліку, але законодавством не передбачено випадків обов'язкового здавання автомобілю на утилізацію. В результаті, за роки існування Закону України «Про утилізацію транспортних засобів» не утилізовано жодного автомобіля.

На цей час в Україні 27 % автомобілів старші 30 років і 47 % автомобілів віком від 10 до 30 років. Відомо, що чим старший автомобіль, тим він завдає більше шкоди довкіллю. Діючі утилізаційні центри в Україні не відповідають жодним нормам. До того ж закон забороняє таким підприємствам брати з українців гроші. Наприклад, у компанії «Сучасний центр утилізації» автомобілі приймають, але платить клієнт. В середньому компанія утилізує 10 машин на рік, що обходиться власнику автомобіля в середньому у 8 тисяч грн. в залежності від параметрів авто.

В Україні, зазвичай, утилізують акумулятори, та навіть таких підприємств мало, є проблема з відсутністю єдиних сертифікованих технологій, обладнання для утилізації небезпечних відходів. На жаль, в Україні поки що немає правил поведінки з небезпечними відходами взагалі, а не тільки з автомобілями, що вийшли з експлуатації, тому в Україні всього 6-7 % території віддано під природно-заповідний фонд, а більше 12 % знаходиться під несанкціонованими звалищами.

Як виглядає ситуація з утилізацію відпрацьованих АТЗ, можна розглянути на прикладі Києва. Загальна кількість зареєстрованих АТЗ у Києві станом на 09.09.2011 року становило більше 797 тис. одиниць, із них більше 672 тис. одиниць АТЗ, які належать фізичним особам. В Києві відсутня єдина керована система збирання, переробки та утилізації непридатних для користування АТЗ.

Про ситуацію в окремих регіонах України можна судити на прикладі Запорізької області. Структура автобусного парку Запорізької області залежно від строків експлуатації становить 2579 одиниць, у т. ч.: до 3 років – 4,5 % від загального обсягу; від 3 до 5 років – 4,5 %; з 5 до 10 років – 10,6 %; понад 10 років – 80,4 %. В структурі парку вантажних автомобілів області транспортні засоби строком експлуатації понад 10 років становлять 85,5 %. Таким чином, більша частина рухомого складу в області потребує оновлення. Поступова заміна транспорту

старіше 10 років на більш новий необхідна для забезпечення безпеки перевезень, поліпшення якості обслуговування, зменшення техногенного навантаження на довкілля [11].

Таким чином, сьогодні система рециклінгу відпрацьованих АТЗ в Україні не працює через відсутність нормативно-правової бази, яка б регламентувала роботу державних і підприємницьких структур у сфері переробки та утилізації непридатних для експлуатації автомобілів, відсутня і сама інфраструктура системи авторециклінгу. Автовласники кидають автомобілі на вулиці через відсутність законодавчого механізму щодо вирішення цих питань, економічного механізму стимулювання і покарання автовласників та системи заходів щодо їх застосування.

Через відсутність необхідного досвіду в галузі поводження з такого роду специфічними відходами, як відпрацьовані АТЗ, слід звернутися до зарубіжного досвіду і орієнтуватися на вимоги ЄС. Директиви ЄС (2000/53/ЄС, 2002/525/ЄС) регулюють питання зношених, «викинутих автомобілів», закликають економічних діячів скорочувати кількість викинутих автомобілів шляхом повторного використання ресурсоцінних матеріалів, усунення небезпечних речовин з автомобілів на етапі його конструювання і включення в дизайн автомобіля все більшого числа відновлюваних матеріалів. Крім того, Директиви встановлюють заборону на використання певних матеріалів у конструкціях або запчастинах автомобілів, встановлюють вимоги по збору і переробці зношених автомобілів. Двома базовими нововведеннями Директиви є наступні: 1) система безкоштовного повернення зношених автомобілів, обов'язкова для дотримання виробниками і іншими економічними суб'єктами (з 1.01.2007 р. обов'язкова для всіх автомобілів); 2) цільові показники по відновленню і переробці зношених автомобілів. Директиви зобов'язують країни-члени приймати необхідні заходи для забезпечення створення суб'єктами економіки систем прийому зношених автомобілів і, наскільки це технічно доцільно, використаних частин, вилучених при ремонті пасажирських автомобілів; створення адекватної кількості пунктів прийому на своїх територіях. Всі непридатні до використання автомобілі мають бути направлені в авторизовані пункти по переробці. У відповідності з рішенням комісії від 19.02.2002 р. про мінімальні вимоги до свідоцтва про знищення транспортного засобу, що видається згідно зі статтею 5(3) Директиви Європейського Парламенту і Ради 2005/53/ЄС про транспортні засоби, строк експлуатації яких

завершився, зношений автомобіль тільки тоді може бути знятий з обліку, коли представлений сертифікат про знищення як свідоцтво того, що автомобіль був переданий в авторизований пункт по переробці і буде їй підданий (розібраний, очищений, подрібнений і перероблений) відповідно до вимог Директиви. Країни-члени, в яких не передбачена процедура зняття з обліку, повинні іншим способом забезпечити інформування компетентних органів про те, що непридатний автомобіль досяг пункту переробки. З 1.01.2006 р. частка переробки і відновлення для всіх автомобілів повинна складати 85 %. Протягом того ж часу частка повторного використання і переробки має бути підвищена мінімум до 80% в середньому на автомобіль на рік. Ці показники збільшені до 95% і 85% відповідно з 1.01.2015 р. [12].

Розглянемо особливості утилізації авто у країнах ЄС. У Німеччині, крім законодавчого зобов'язання прийому та утилізації старих авто на безкоштовній основі для кінцевого споживача, прийнято закон, згідно з яким виконуються вимоги щодо комплектації авто з 1 січня 2006 р. на 85 %, а з 1 січня 2015 р. – на 95 % з матеріалів, які піддаються вторинному використанню. Відповідно до декрету уряду, а також положень Кодексу Франції про навколишнє середовище, в країні створена мережа спеціалізованих центрів з утилізації авто з розрахунку 7 центрів на 1,5 млн. населення. Вона забезпечується інформаційною, технологічною та, в деяких випадках, фінансовою підтримкою з боку автовиробників. Кожен власник авто, що стало непридатним, зобов'язаний передати його на утилізацію в сертифікований центр. В іншому випадку законодавством передбачено штраф у розмірі €1175 тис. і 2 роки ув'язнення. Таке ж покарання передбачене за проведення утилізації авто в недозволених місцях і організаціями, що не мають на це права. У Швейцарії створений спеціальний Фонд-підприємство під назвою Auto Recycling Suisse, який уповноважений здійснювати утилізацію автомобілів, непридатних для використання. З 1 січня 2006 р. в Польщі діє податок на утилізацію в розмірі 500 злотих за кожне АТЗ, ввезений на територію країни. Зазначені кошти йдуть на рахунок Національного фонду охорони навколишнього середовища і водного господарства. У Норвегії покупець транспортного засобу зобов'язаний заплатити одноразовий збір у розмірі 2000 норвезьких крон (приблизно \$ 350). Ця сума повертається власнику АТЗ при передачі його на утилізацію. Утилізація автомобілів в австрійському законодавстві має кілька категорій екологічних по-

датків: на вантажівки – ставка податку залежить від повної маси машини (від €1,55 до €1,90 за кожну тону в місяць), оподаткуванню за шкалою повної маси підлягають також вантажні причепа; на нормативне використання палива – сплачується одноразово в момент придбання нового авто; страховий податок на моторизовані АТЗ повною масою до 3,5 тони (річні ставки податку в залежності від потужності двигуна складають від €66 до €943,80). У Бельгії власники легкових машин платять дорожній податок за такою формулою:  $799 \text{ см}^3 - 84 \text{ €/рік}$ ,  $800-2499 \text{ см}^3 - 148 \text{ €/рік}$  і від  $2500 \text{ см}^3 - 208 \text{ €/рік}$ . Утилізаційний збір для автомобілів закладається у дорожній податок. Утилізація автомобіля здійснюється в спеціалізованому пункті – державному або приватному, який має державну ліцензію. У Нідерландах вдалося сформувати найбільш вдалу і ефективну систему утилізації авто, яка дозволила вирішити практично всі проблемні питання, пов'язані з утилізацією старих автомобілів. Середній коефіцієнт вторинної переробки машин в цій країні 96,2% – найвищий в світі. Під час першого поставлення на облік кожного нового авто сплачується утилізаційний збір в розмірі €45 [13].

США переробляють 95 % старих автомобілів в рік. Технологія утилізації в США інша, ніж в Європі. На багатьох звалищах відпрацьовані автомобілі пресують. При переплавлянні залишки гуми і тканини вигорають. До основних особливостей американської системи можна віднести: продаж старих або розбитих автомобілів на аукціонах; об'єднання розбирання і рециклінгу; отримання основного доходу від продажу запчастин; наявність великого експортного ринку старих запчастин; продаж каркасів автомобілів; високу ціну зберігання та захоронення відходів, локальні екологічні програми як стимули для підвищення рівня переробки; повну самоокупність. З 2012 р. підприємства США переходять до більш досконалих європейських методів переробки. 1 липня 2009 року почала діяти американська федеральна програма Car Allowance Rebate System (CARS), в просторіччі відома як «готівка за автохлам» з бюджетом у \$3 млрд. Програма також сприяла зростанню економіки за рахунок збільшення продажів автомобілів. Залежно від типу нового автомобіля і різниці в споживанні палива нового та старого авто, учасники програми отримували ваучери на знижку в розмірі \$3,500 або \$4,500. Сталі, отриманої шляхом переробки в 2009 р. в США, вистачило б на виготовлення 13 млн. нових автомобілів. В результаті програми середня паливна ефективність автомобільного парку збільшилася

на 58% (з 15,8 до 24,9 миль на галон).

В Японії Закон про утилізацію старих авто введений в дію в 2000 р, оновлений в 2008 р. Закон зобов'язує всіх автовласників достроково виплачувати вартість переробки і утилізації своїх транспортних засобів, коли вони досягають кінця терміну експлуатації. Програма управляється створеної урядом некомерційною організацією – Японським центром автомобільного рециклінгу та консорціумом виробників автомобілів і компаній з утилізації. Офіційним підтвердженням оплати за утилізацію автомобіля є спеціальний ваучер. Ваучер на переробку видається дилером чи передається від одного автовласника іншому при продажу автомобіля. Однак навіть при використанні старих автомобілів все одно доведеться заплатити еквівалентну плату за утилізацію в Японському центрі автомобільного рециклінгу. Ваучер пред'являється при технічному огляді, який відбувається кожні 2 роки, і вилучається при здачі автомобіля на переробку. Зазвичай підсумковий розмір податку складає від 10 000 до 20 000 ієн. В Японії при здачі старої машини і купівлі нової з низьким рівнем шкідливих викидів можна було отримати знижку до \$3 тис. [14].

Відповідно до міжнародних норм термін експлуатації легкового автомобіля становить 10 років, після чого слід відповідним чином утилізувати, щоб він не чинив негативного впливу на стан довкілля. Щорічно в ЄС виготовляється 11 млн. автомобілів, тим часом утилізується 6-7 млн. автомобілів. У 2008-2010 рр. в деяких країнах ЄС за підтримки держави діяли програми, що дозволяли обміняти старий автомобіль на новий. Власник при здачі на рециклінг старого автомобіля отримував за нього бонус (Німеччина – €2,5 тис. + €2 тис. при купівлі німецьких автомобілів, Франція – €1 тис. + €700 при купівлі авто з низьким рівнем екологічно небезпечних викидів, Великобританія – £2 тис., Італія – €1,5-6,5 тис. залежно від відповідності автомобіля стандартам екологічної безпеки). Є й інші варіанти стимулювання. «Утилізаційні бонуси» існують в 13 країнах Європи та США. Число утилізованих автомобілів корелюється з числом проданих: коефіцієнт кореляції в Німеччині – 0,94, у Франції – 0,85. Тільки в Нідерландах 300 пунктів прийому старих авто і 12 шредерних заводів (шредерні установки – обладнання, які призначаються для подрібнення чорних і кольорових металів) [15].

Принципи утилізації і рециклінгу відпрацьованих АТЗ в розвинених країнах світу детально розглянуті в роботах [16, 17, 18,

19 та ін.].

Однією зі складних проблем при переробці вторинних металів є переробка легковагового, зокрема, автомобільного брухту, оскільки такий брухт містить велику кількість неметалічних матеріалів, а також кольорових металів. Технологічний процес переробки легковагового металобрухту включає наступні операції: 1) підготовку автомобіля; 2) завантаження кузова автомобіля в дробарку; 3) дроблення кузова; 4) очищення і сортування роздробленого металобрухту; 5) видалення і складування готової продукції. Витрата енергії при дробленні кузовів залежить від комплектності автомобіля, зокрема, наявності шин, двигуна та ін. Тому з автомобіля перед дробленням знімаються двигун, шини, паливний бак, акумулятор, радіатор. Після дроблення автомобіля отримують три фракції: магнітну (чорні метали), повітряну (неметалічні матеріали з низькою щільністю) і фракцію, в яку входять всі кольорові метали – алюміній, цинк, мідь, а також нержавіюча сталь. При подрібненні автомобіля утворюються пожежонебезпечний пил полімерних і текстильних матеріалів, присутніх в автомобілі, а також вибухонебезпечні суміші розпорошених масел і залишків палива, присутніх в автомобілі навіть після їх видалення при підготовці кузова до утилізації. Такі пожежно- і вибухонебезпечні суміші необхідно видаляти з дробарки якомога повніше і швидше. Подрібнені матеріали кузова відводяться з дробарки у шахту повітряного сепаратора для розділення металеві і неметалічної фракцій. Відібрані неметалічні матеріали і кольорові метали складуються роздільно і вивозяться з цеху на інші ділянки або для подальшої утилізації на заводі, або для продажу спеціалізованим підприємствам [12].

Навряд чи, зараз в Україні реально утилізувати АТЗ віком понад 10 років. Оскільки на цей час в Україні 27 % автомобілів старші 30 років, то, при необхідності обов'язкової утилізації, їх кількість буде складати приблизно 2,5 млн. одиниць. При такій кількості відпрацьованих автомобілів на кожну область України буде приходиться 100 тис. АТЗ віком понад 30 років. Навряд чи можливе буде утворення центрів утилізації у кожній області, але на першому етапі доцільна організація таких центрів, наприклад, у кожному економічному районі (кластері). Це дозволить в кінці свого «життя» перетворювати відпрацьовані АТЗ в корисну продукцію, знизити рівень негативного впливу на довкілля і отримати не тільки екологічний, але і соціально-економічний ефект.

#### 4. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- система поводження з великогабаритною складовою муніципальних відходів в регіонах України знаходиться в початковому стані;
- реалізація системи поводження з великогабаритною складовою ТМВ передбачає створення окремого модулю прийому та розбирання таких відходів в пункті рециклінга, розташованого на місці одного з внутрішньоквартальних контейнерних майданчиків, або створення майданчиків для збору великогабаритних відходів;
- при диференціації потоків ТМВ не приділяється належної уваги відпрацьованим автомобілям, які умовно можна віднести до потенційних великогабаритних вторинних матеріальних ресурсів, а діючі утилізаційні центри в Україні не відповідають жодним нормам;
- при необхідності обов'язкової утилізації автомобілів, старіших ніж 30 років, їх кількість буде складати приблизно 2,5 млн. одиниць, а тому на першому етапі доцільна організація таких центрів, наприклад, у кожному економічному районі, або у окремих кластерах;
- створення системи поводження з великогабаритними муніципальними відходами в регіонах України дозволить перетворювати їх в корисну продукцію, знизити рівень негативного впливу на довкілля і отримати не тільки екологічний, але і соціально-економічний ефект.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pichtel John. *Waste Management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial: second ed.* CRC Press. 2014. 682 p. URL: [https://books.google.com.ua/books/about/Waste\\_Management\\_Practices.html?id=bKLAAGAAQBAJ&redir\\_esc](https://books.google.com.ua/books/about/Waste_Management_Practices.html?id=bKLAAGAAQBAJ&redir_esc) (Accessed 11 April 2020).
2. Черп О. М., Винниченко В. Н. Проблема твердых бытовых отходов: комплексный подход. *Эколайн, ECOLOGIA*. 1996. 43 с. URL: [www.waste.ru/modules/library/visit.php?cid=6&lid=54](http://www.waste.ru/modules/library/visit.php?cid=6&lid=54) (дата звернення: 07.02.2020 р.).
3. Статистика отходов. 2013. 107 с. URL: [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/cees/ces/ge.33/2013/mtg4/Desk\\_study\\_RU.pdf](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/cees/ces/ge.33/2013/mtg4/Desk_study_RU.pdf) (дата звернення: 07.04.2020).
4. Проект Закону України «Про управління відходами». URL: <https://menr.gov.ua/news/32869.html> (дата звернення: 07.04.2020 р.).
5. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80> (дата звернення: 07.04.2020 р.).
6. Управління та поводження з муніципальними відходами: практикум / Сафранов Т. А. та ін.; Одеський державний екологічний університет. Одеса : ТЕС, 2014. 198 с.
7. Сафранов Т. А., Шаніна Т. П., Приходько В. Ю.

Класифікація твердих побутових відходів як передумова формування системи поводження з ними в регіонах України: монографія / Одеський державний екологічний університет. Дніпро : Видавець Біла К.О., 2018. 100 с.

8. Методичні рекомендації з розроблення регіональних планів управління відходами. URL: [https://menr.gov.ua/files/docs/nakazy/2019/nakaz\\_142.pdf](https://menr.gov.ua/files/docs/nakazy/2019/nakaz_142.pdf) (дата звернення: 05.04.2020 р.).
9. Кужель В. П., Севостьянов С. М. Екологія та ресурсозбереження на автомобільному транспорті. Вінниця : ВНТУ, 2013. 105 с.
10. Закон України «Про утилізацію транспортних засобів». *Відомості Верховної Ради (ВВР)*. 2014. № 20-21. Ст. 719.
11. Фатюха Н. Г. Статистична оцінка розвитку автомобільного транспорту Запорізької області. *Ефективна економіка*. 2016. 4. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?n=4&y=2016> (дата звернення: 11.04.2020 р.).
12. Управління та поводження з відходами: підручник / Т. П. Шаніна та ін.; за ред. Т. А. Сафранова, М. О. Клименко. Одеса : ТЕС, 2012. 272 с.
13. Утилизация авто: опыт Евросоюза. URL: <https://www.autocentre.ua/avtopravo/avtobiznes/utilizatsiya-avto-opyt-evrosoyuza-2-265772.html> (дата звернення: 11.04.2020 р.).
14. Малихина О. В., Беляев А. И. Экономические пути к утилизации автомобилей. *Фундаментальные исследования*. 2017. № 8-2. С. 412-416.
15. Миронова М. Н., Липовская Н. И. Эффективность программ утилизации автомобилей в Германии и Франции. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия Экономика*. 2016. № 2. С. 7-17.
16. Вишняков Я. Д., Васляев М. А. Система утилизации автотранспортных средств и отходов технического обслуживания. *Экология и промышленность России*. 2007. № 10. С. 50-52.
17. Райнхард В. А. Переработка старых автомобилей: Европейский опыт. *Твердые бытовые отходы*. 2007. № 10. С. 70-77.
18. Утилизация и рецикллинг автомобилей. URL: <http://privetstudent.com/referaty/referaty-po-ekologii/1433-utilizaciya-i-recikling-avtomobiley.html> (дата звернення: 11.04.2020 р.).
19. Системы утилизации легковых автомобилей. URL: <http://www.avtomash.ru/guravto/2007/20070703.htm> (дата звернення: 08.04.2020 р.).
20. Дзяд Е. В., Андрухив Е. В. Особенности национальных политик управления отходами стран-членов ЕС. *Вісник Дніпровського університету. Серія «Світове господарство і міжнародні економічні відносини»*. 2018. Вип. 10. С. 17-27.

#### REFERENCE

1. Pichtel, John. (2014). *Waste Management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial: second ed.* CRC Press. Available at: [https://books.google.com.ua/books/about/Waste\\_Management\\_Practices.html?id=bKLAAGAAQBAJ&redir\\_esc](https://books.google.com.ua/books/about/Waste_Management_Practices.html?id=bKLAAGAAQBAJ&redir_esc) (Accessed 11 April 2020).
2. Cherp, O.M. & Vinnichenko, V.N. (1996). *Problema tverdykh bytovykh otkhodov: kompleksnyy podkhod [The problem of municipal solid waste: an integrated approach]*. Ekolayn, ECOLOGIA. (in Russ.)
3. *Statistika otkhodov [Waste statistics]*. (2013). Available at: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/>

- ece/ces/ge.33/2013/mtg4/Desk\_study\_RU.pdf (Accessed 4 April 2020). (in Russ.)
4. Proekt Zakonu Ukrainy` «Pro upravlinnia vidkhodamy» [Draft Law of Ukraine "On Waste Management"]. Available at: <https://menr.gov.ua/news/32869.html> (Accessed 7 April 2020). (in Ukr.)
5. Natsionalna strategii upravlinnia vidkhodamy v Ukraini do 2030 roku [National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80> (Accessed 7 April 2020). (in Ukr.)
6. Safranov, T.A. et al. (2014). *Upravlinnia ta povodzhennia z munitsypalnymi vidkhodamy: praktykum [Municipal waste management and management: a workshop]*. Odesa: TES. (in Ukr.)
7. Safranov, T.A., Shanina, T.P. & Prykhodko, V.Yu. (2018). *Klasyfikatsiia tverdykh butovykh vidkhodiv yak peredumova formuvannia systemy` povodzhennia z nymy v rehionakh Ukrainy [Classification of municipal solid waste as a prerequisite for the formation of a solid waste management system in the regions of Ukraine]*. Dnipro: Publ Bila K.O. (in Ukr.)
8. *Metodychni rekomendatsii z rozroblennia rehionalnykh planiv upravlinnia vidkhodamy [Methodical recommendations for the development of regional waste management plans]*. Available at: [https://menr.gov.ua/files/docs/nakazy/2019/nakaz\\_142.pdf](https://menr.gov.ua/files/docs/nakazy/2019/nakaz_142.pdf) (Accessed 7 April 2020). (in Ukr.)
9. Kuzhel, V.P. & Sevostianov, S.M. (2013). *Ekolohiia ta resursozberzhennia na avtomobilnomu transporti [Ecology and resource conservation by road]*. Vinnytsia: VNTU.
10. Zakon Ukrainy «Pro utylizatsiiu transportnykh zasobiv» [Law of Ukraine "On Recycling of Vehicles"] (2014). *Vidomosti Verkhovnoi Rady [Vidomosti of Verkhovna Rada]*, 20-21, art. 719.
11. Fatiukha, N.G. (2016). Statystychna otsinka rozvytku avtomobilnoho transportu Zaporizkoi oblasti [Statistical evaluation of road transport development in Zaporizhzhya region]. *Efektivna ekonomika [An efficient economy]*, 4. Available at: <http://www.economy.nayka.com.ua/?n=4&y=2016> (Accessed 11 April 2020). (in Ukr.)
12. Shanina T.P. et al. (2012). *Upravlinnia ta povodzhennia z vidkhodamy [Waste management and management]*. Edited by T.A. Safranov and M.O. Klymenko. Odesa: TES. (in Ukr.)
13. *Utilizatsiya avto: opyt Evrosoyuza [Auto recycling: EU experience]*. Available at: <https://www.autocentre.ua/avtopravo/avtobiznes/utilizatsiya-avto-opyt-evrosoyuza-2-265772.html> (Accessed 11 April 2020). (in Russ.)
14. Malikhina, O.V. & Belyaev, A.I. (2017). Ekonomicheskie puti k utilizatsii avtomobiley [Economic ways to recycle cars]. *Fundamentalnyye issledovaniya [Basic research]*, 8-2, pp. 412-416. (in Russ.)
15. Mironova, M.N. & Lipovskaya, N.I. (2016). Effektivnost programm utilizatsii avtomobiley v Germanii i Frantsii [The effectiveness of car recycling programs in Germany and France]. *Vestnik Rosiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya Ekonomika [Bulletin of the Russian University of Friendship of Peoples. Series Economics]*, 2, pp. 7-17. (in Russ.)
16. Vishnyakov, Ya.D. & Vaslyayev, M.A. (2007). Sistema utilizatsii avtotransportnykh sredstv i otkhodov tekhnicheskogo obsluzhivaniya [A system for the disposal of vehicles and maintenance wastes.]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii [Ecology and industry of Russia]*, 10, pp. 50-52. (in Russ.)
17. Raynhard, V.A. (2007). Pererabotka starykh avtomobiley: Evropeyskiy opyt [Recycling old cars: European experience]. *Tverdyie byitovye othodyi [Municipal solid waste]*, 10, pp. 70-77. (in Russ.)
18. *Utilizatsiya i retsikling avtomobiley [Utilization and recycling of cars]*. Available at: <http://privetstudent.com/referaty/referaty-po-ekologii/1433-utilizatsiya-i-recikling-avtomobiley.html> (Accessed 11 April 2020). (in Russ.)
19. *Sistemy utilizatsii legkovykh avtomobiley [Disposal systems for passenger cars]*. Available at: <http://www.avtomash.ru/guravto/2007/20070703.htm> (Accessed 8 April 2020). (in Russ.)
20. Dzyad, E.V. & Andrukhiv, E.V. (2018). Osobennosti natsionalnykh politik upravleniya otkhodami stran-chlenov ES [Features of national waste management policies of EU member states]. *Visnik Dniprovskoho universytetu. Seriya «Svitove hospodarstvo i mizhnarodni ekonomichni vidnosyny» [Bulletin of the Dnipro University. The World Economy and International Economic Relations series]*, 10, pp. 17-27.

## CURRENT STATE AND POSSIBILITIES FOR OVERSIZED MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT IN THE REGIONS OF UKRAINE

**T. A. Safranov, T. P. Shanina,  
V. Yu. Prykhodko**

Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, [safranov@ukr.net](mailto:safranov@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0003-0928-5121>

Human life and activities generate municipal solid waste (MSW) consisting of municipal household waste (residential waste), waste from commercial organizations, waste from public institutions and organizations, waste from industrial enterprises, waste from urban maintenance and improvement. A common feature for all these types of waste is the fact that a municipality is an institution responsible for organization, management of its disposal process. Such waste is generated in everyday life, across the food network, when carrying out repair and construction

works, in the municipal transport and communication systems, etc. The aim of the work is to assess the current state and possibilities of oversized municipal waste management in the regions of Ukraine. In order to achieve this aim, the study of the existing regulatory documents and existing experience in the field of oversized municipal waste management was conducted. The work is based on the analysis of the published data, as well as on the materials of our own research. The implementation of the MSW management system implies creation of a municipal center for recycling secondary raw materials based on the modular quarterly principle. A recycling station with a mandatory module for oversized waste reception and sorting should become a main structural element of the recycling center. In addition, it is proposed to create separate sites for collecting the oversized waste. This has already been implemented in some cities of Ukraine. When differentiating SMW flows, due attention is not paid to the used cars that can contingently be attributed to oversized secondary raw materials. In Ukraine the existing recycling centers do not meet modern requirements. Due to the lack of necessary experience in handling the used cars, one should turn to foreign experience and focus on the requirements of the developed countries. According to international standards, the life of a car is 10 years with its subsequent utilization in such a way that prevents it from having a negative impact on the environment. Since, as of today, 27% of cars in Ukraine are older than 30 years, so in case of their mandatory utilization, the number of such cars will be approximately 2.5 million. With such total number of used cars each region of Ukraine will need to handle about 100 thousand recyclable cars. It is hardly possible to create the recycling centers in each region, so, at the first stage, it is advisable to organize such centers, for example, in each economic region or cluster. The creation of the oversized municipal waste management system in the regions of Ukraine will make it possible to turn the waste into useful products, to reduce the level of a negative environmental impact and to obtain not only ecological, but also socio-economic effects.

**Keywords:** municipal solid waste, oversized waste, used cars, utilization, recycling.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЩЕНИЯ С КРУПНОГАБАРИТНЫМИ МУНИЦИПАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ В РЕГИОНАХ УКРАИНЫ

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

*Одесский государственный экологический университет*  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [safranov@ukr.net](mailto:safranov@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0003-0928-5121>

В процессе жизнедеятельности человека образуются твердые муниципальные отходы (ТМО), которые состоят из твердых бытовых отходов (отходов жилого фонда), отходов коммерческих организаций, отходов общественных учреждений и организаций, отходов промышленных предприятий, отходов обслуживания и благоустройства городов. Общим признаком для всех этих видов отходов является то, что организация, управление и ответственность за утилизацию принадлежит городским властям – муниципалитетам. Образуются такие отходы в быту, в сети питания, при проведении строительно-ремонтных работ, в муниципальных системах транспорта, связи и т.д. Целью работы является оценка современного состояния и возможностей обращения с крупногабаритными муниципальными отходами в регионах Украины. Для достижения этой цели проанализированы существующие нормативно-законодательные документы и имеющийся опыт в сфере обращения с крупногабаритными муниципальными отходами. Работа основывается на анализе опубликованных данных, а также на материалах собственных исследований. Реализация системы обращения с ТМО предусматривает создание муниципального центра утилизации вторичных материальных ресурсов на основе модульно-поквартального принципа. Основным структурным элементом центра утилизации должен стать пункт рециклинга с обязательным модулем приема и разборки крупногабаритных отходов. Кроме того, предлагается создание отдельных площадок для

сбора крупногабаритных отходов, что уже реализуется в некоторых городах Украины. При дифференциации потоков ТМО не уделяется должного внимания отработанным автомобилям, которые условно можно отнести к крупногабаритным вторичным материальным ресурсам. Действующие утилизационные центры в Украине не соответствуют современным требованиям. Из-за отсутствия необходимого опыта в области обращения с отработанными автомобилями, следует обратиться к зарубежному опыту и ориентироваться на требования развитых стран. Согласно международным нормам срок эксплуатации легкового автомобиля составляет 10 лет, с последующей утилизацией таким образом, чтобы он не оказывал негативного влияния на состояние окружающей среды. Поскольку в настоящее время в Украине 27% автомобилей старше 30 лет, то при необходимости обязательной утилизации их количество будет составлять примерно 2,5 млн. единиц. При таком количестве отработанных автомобилей на каждую область Украины будет приходиться около 100 тыс. автомобилей, подлежащих утилизации. Вряд ли возможно создание центров утилизации в каждой области, поэтому на первом этапе целесообразно организация таких центров, например, в каждом экономическом районе или кластере. Создание системы обращения с крупногабаритными муниципальными отходами в регионах Украины позволит превращать их в полезную продукцию, снизить уровень негативного воздействия на окружающую среду и получить не только экологический, но и социально-экономический эффекты.

**Ключевые слова:** твердые муниципальные отходы, крупногабаритные отходы, отработанные автомобили, утилизация, рециклинг.

*Подання до редакції : 16. 04. 2020  
Надходження остаточної версії : 23. 04. 2020  
Публікація статті : 03. 07. 2020*

УДК 551.46.0:551.465

## ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНЦІЙ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД МІСТА ОДЕСА ЯК ДЖЕРЕЛ БІОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ МОРСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА В СУЧАСНИЙ ПЕРІОД

Ю. С. Тучковенко, О. Ю. Сапко, О. А. Тучковенко

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

Станції біологічного очищення (СБО) стічних вод міста Одеса («Північна» і «Південна») є найбільш потужними постійно функціонуючими джерелами біогенного забруднення прибережних вод Одеського району північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ) та Хаджибейського лиману. В роботі виконаний порівняльний аналіз змін, які відбулись з початку ХХІ століття у якісному складі зворотних вод СБО «Північна» і «Південна» та кількості надходження з ними до морського середовища біогенних речовин, а також можливого впливу цих змін на евтрофікацію прибережних вод Одеського району та Хаджибейського лиману. Встановлено, що незважаючи на значне (в 1,7-2 рази) зменшення в останнє десятиріччя обсягів скидів зворотних вод з СБО, надходження з ними до морського середовища нітратів і нітритів збільшилось в 4-6 разів. В той же час надходження органічної речовини, амонійного азоту і фосфатів зменшилось.

Очисні споруди міста Одеса були введені в експлуатацію в 70-х роках минулого століття. На них використовується типова для того часу технологія біологічної очистки стічних вод від сполук біогенних елементів в аеротенках в аеробних умовах, яка у відношенні до очищення від сполук азоту є незакінченою, оскільки кінцевим її продуктом є нітратний азот у великих концентраціях. Після надходження до морського середовища він споживається водоростями при первинному продукуванні органічної речовини, і, таким чином, знову перетворюється в органічний азот. Відзначено, що оскільки прибережні води Одеського району ПнЗЧМ і Хаджибейського лиману мають високий рівень трофності, а баланс між вмістом мінерального азоту і фосфору в їх водах, у порівнянні зі стандартним стехіометричним співвідношенням Редфілда, в теперішній час порушено у бік нестачі запасів мінерального азоту, то додаткове надходження нітритів і нітратів до морського середовища зі зворотними водами СБО може, за певних умов, сприяти цвітінню водоростей і призводити до загострення негативних наслідків евтрофікації.

Зроблений висновок про те, що для зменшення потоку надходження нітратів до морського середовища, на СБО «Північна» та «Південна» повинна бути впроваджена сучасна технологічна схема поглибленого біологічного очищення стічних вод від сполук азоту, яка забезпечує реалізацію не тільки процесу нітрифікації, але й денітрифікації.

**Ключові слова:** Чорне море, Одеський район, евтрофікація вод, біологічне очищення стічних вод, технології

### 1. ВСТУП

На морському узбережжі Одеського мегаполісу функціонують станції біологічного очищення (СБО) стічних вод міста Одеса (СБО «Північна» і «Південна»), а також міст-портів Чорноморськ і Південний, які є постійно діючими джерелами біогенного забруднення морського середовища. З них найбільш потужними джерелами є очисні споруди м. Одеси. Детальний опис цих джерел та оцінки їх впливу на якість морських вод станом на початок ХХІ ст. наведені в [1]. Згідно з ним, сукупний внесок СБО «Північна» і «Південна» у загальний річний обсяг надхо-

дження біогенних речовин до морського середовища від всіх типів берегових антропогенних джерел забруднення (включно зі зливовими, дренажними та промисловими стоками) складав близько 90 % за амонійним азотом та фосфатами, 40 % за нітритним азотом, 38 % за нітратним азотом. Виконані в [2, 3] оцінки якості вод Одеського району північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ), із використанням індексу забруднення води, свідчать, що в періоди, коли скид частково очищених стічних вод з СБО «Північна» здійснювався не в прибережну зону моря (на відстані  $\approx 300$  м від берега), а в Хаджибейський лиман (наприклад, в 2011–2013 рр.),

екологічний стан морської акваторії в районі розташування СБО «Північна» значно покращувався. Зокрема, якщо в 2009-2010 рр. морська вода в районі випуску СБО оцінювалася за якістю як «брудна» V класу, то в 2011 р. – вже «чиста» II класу [3]. В той же час, в період 2006-2011 рр., в районі скиду зворотних вод СБО «Південна» якість морської води за значеннями індексу забруднення в переважній більшості років відповідала категорії «забруднена» IV класу [3].

Наведені в [4] данні свідчать, що ефективність очистки стічної води на СБО «Північна» набагато поступається такій, що існує і використовується в розвинених країнах та на деяких СБО в Україні, які працюють за сучасними технологіями. Зроблений висновок, що впровадження більш ефективної технології обробки стічної води може знизити навантаження на морську акваторію Одеської затоки та Хаджибейський лиман в багато разів.

В останнє десятиріччя скид зворотних вод з СБО «Північна» здійснювався постійно або з нетривалими перервами до Хаджибейського лиману, що призвело до підвищення рівня води в ньому до небезпечних позначок, виникнення загрози техногенної катастрофи, пов'язаної з проривом дамби, яка відділяє лиман від прилеглої території м.Одеса, та затопленням значної частини території міста. Для запобігання цій загрозі, знову актуальним стало питання поновлення скиду зворотних вод СБО «Північна» до моря.

Зважаючи на значний внесок обох СБО у формування якості морських вод в прибережній рекреаційній зоні Одеського узбережжя [1], актуальною задачею є визначення тих змін, які відбулися в останнє десятиріччя, у якісному складі зворотних вод, що надходять від СБО до морського середовища, та можливих екологічних наслідків цих змін.

Метою роботи є порівняльний аналіз змін з початку XXI століття, які відбулись у якісному складі та кількості надходження до морського середовища біогенних речовин зі зворотними водами станцій біологічного очищення стічних вод м. Одеса, а також можливого впливу цих змін на евтрофікацію прибережних вод Одеського району північно-західної частини Чорного моря.

Згідно з угодою про асоціацію з ЄС, Україна взяла на себе зобов'язання імплементувати, серед інших, Рамкову Директиву ЄС про Морську стратегію. Відповідно до цієї директиви, повинні бути визначені шляхи досягнення так званого «доброго екологічного статусу» морських аква-

торій через реалізацію низки природоохоронних заходів, які усувають або зменшують негативний антропогенний вплив на морські екосистеми. Обґрунтування одного з таких заходів, є результатом проведеного дослідження.

## 2. МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В роботі використовувалась інформація про об'єми скидів та якісний склад зворотних вод, що надходять в прибережну рекреаційну зону моря м. Одеси від СБО «Північна» та «Південна», яка міститься в [1, 5-7].

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На рис. 1 наведено річні об'єми зворотних вод, що потрапляють в морське середовище після очисних споруд СБО «Північна» і «Південна». Видно, що з початку XXI ст. має місце добре виражена тенденція до зменшення обсягів стічних вод м. Одеса, що надходять на очисні споруди СБО «Північна» і «Південна» і, відповідно, на виході з них. Якщо для станції СБО «Північна» в 2000 р. цей обсяг становив 96,59 млн. м<sup>3</sup>/рік, то в 2016 р. – 56,43 млн. м<sup>3</sup>/рік. Також і для СБО «Південна» у 2000 р. обсяг склав 55,61 млн. м<sup>3</sup>/рік, а в 2016 р. – 27,18 млн. м<sup>3</sup>/рік. Значне зменшення в останнє десятиріччя обсягів скидання зворотних вод з СБО обумовлено підвищенням тарифів на споживання води користувачами (в 6 разів порівняно з 2009 р.), суворим контролем витрат свіжої води питної якості господарчими та житлово-комунальними об'єктами інфраструктури міста (установка лічильників на вході), реалізацією заходів щодо раціонального використання водних ресурсів на підприємствах.

Зміни показників якості зворотних вод, які впливають на евтрофікацію, на виході з очисних споруд СБО «Південна» та «Північна» у XXI ст. представлені в табл. 1, 2. Звертає на себе увагу різке зростання у другому десятиріччі концентрацій нітритного та нітратного азоту в зворотних водах обох СБО. В 2016 р. вміст нітратного азоту, порівняно з даними 2009 р., збільшився в 8 разів в зворотних водах СБО «Північна» і в 6 разів – в зворотних водах СБО «Південна». За нітритним азотом збільшення відбулося в 3 і 6 разів, відповідно. В той же час, концентрації інших показників змінювались в значно менших межах. В зворотних водах СБО «Північна» значення БСК<sub>повне</sub>, перманганатної окиснюваності, вмісту амонійного азоту у другому десятиріччі були досить стабільними порівняно з 2009 р., а концентрації фосфатів збільшились на  $\approx 30\%$ .

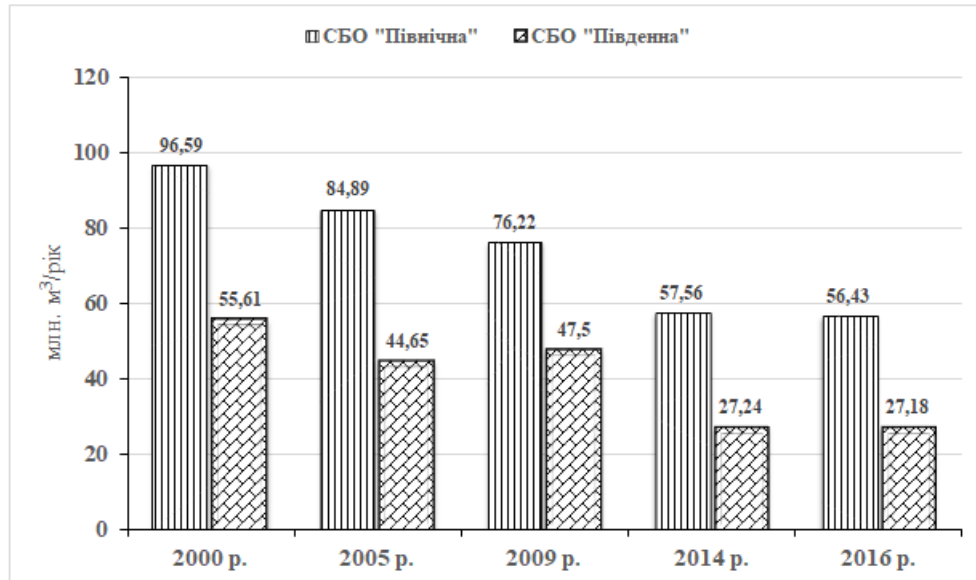


Рис. 1 – Річні об'єми зворотних вод, що потрапляли до морського середовища після очищення на очисних спорудах СБО «Північна» та СБО «Південна», млн. м³/рік

Таблиця 1 – Показники якості стічних вод на виході з очисних споруд СБО «Північна» в період 2000-2016 рр.

| Найменування показника              | Концентрація |             |             |              |              |
|-------------------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
|                                     | 2000 р.      | 2005 р.     | 2009 р.     | 2014 р.      | 2016 р.      |
| БСК <sub>повне</sub> , мг/дм³       | 5,24         | 11,80       | 13,90       | 13,87        | 13,87        |
| Перманганатна окиснюваність, мг/дм³ | 5,34         | 8,50        | 9,20        | 8,70         | 10,20        |
| Азот амонійний, мг/дм³              | 1,50         | 5,87        | 6,50        | 6,60         | 6,71         |
| Азот нітритний, мг/дм³              | <b>0,12</b>  | <b>0,37</b> | <b>0,84</b> | <b>2,78</b>  | <b>2,65</b>  |
| Азот нітратний, мг/дм³              | <b>6,08</b>  | <b>3,71</b> | <b>3,80</b> | <b>28,69</b> | <b>31,50</b> |
| Фосфати, мг/дм³                     | 3,80         | 4,63        | 3,00        | 3,98         | 4,00         |

Таблиця 2 – Показники якості стічних вод на виході з очисних споруд СБО «Південна» в період 2000-2016 рр.

| Найменування показника              | Концентрація |             |             |              |             |
|-------------------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
|                                     | 2000 р.      | 2005 р.     | 2009 р.     | 2014 р.      | 2016 р.     |
| БСК <sub>повне</sub> , мг/дм³       | 10,75        | 14,56       | 12,24       | 12,01        | 14,3        |
| Перманганатна окиснюваність, мг/дм³ | 8,86         | 8,90        | 10,8        | 12,5         | 14,5        |
| Азот амонійний, мг/дм³              | 7,41         | 4,66        | 6,80        | 8,70         | 8,40        |
| Азот нітритний, мг/дм³              | <b>0,14</b>  | <b>0,24</b> | <b>0,26</b> | <b>1,52</b>  | <b>1,57</b> |
| Азот нітратний, мг/дм³              | <b>3,78</b>  | <b>4,72</b> | <b>5,45</b> | <b>23,15</b> | <b>33,4</b> |
| Фосфати, мг/дм³                     | 2,13         | 5,04        | 9,30        | 8,49         | 7,60        |

Для СБО «Південна» простежується тенденція збільшення значення перманганатної окиснюваності на 34 % та амонійного азоту на  $\approx 25$  %, а концентрації фосфатів, навпаки, зменшились на 22 %.

На рис. 2, 3 показані зміни річних потоків надходження до морського середовища біогенних речовин від СБО «Північна» і «Південна», які відбулись з початку ХХІ ст. Видно, що з урахуванням зменшення обсягів скиду зворотних вод, які відбулись у другому десятиріччі, змен-

шилось, порівняно з 2005 та 2009 рр., надходження до морського середовища фосфатів і амонійного азоту від СБО «Північна». Для СБО «Південна» також відзначається зменшення надходження зі зворотними водами амонійного азоту, порівняно з 2000 та 2009 рр., і фосфатів, порівняно з 2009 р.). Але для обох СБО притаманна чітко виражена тенденція збільшення в 4-6 разів річних потоків надходження до морського середовища азоту нітритів і нітратів.

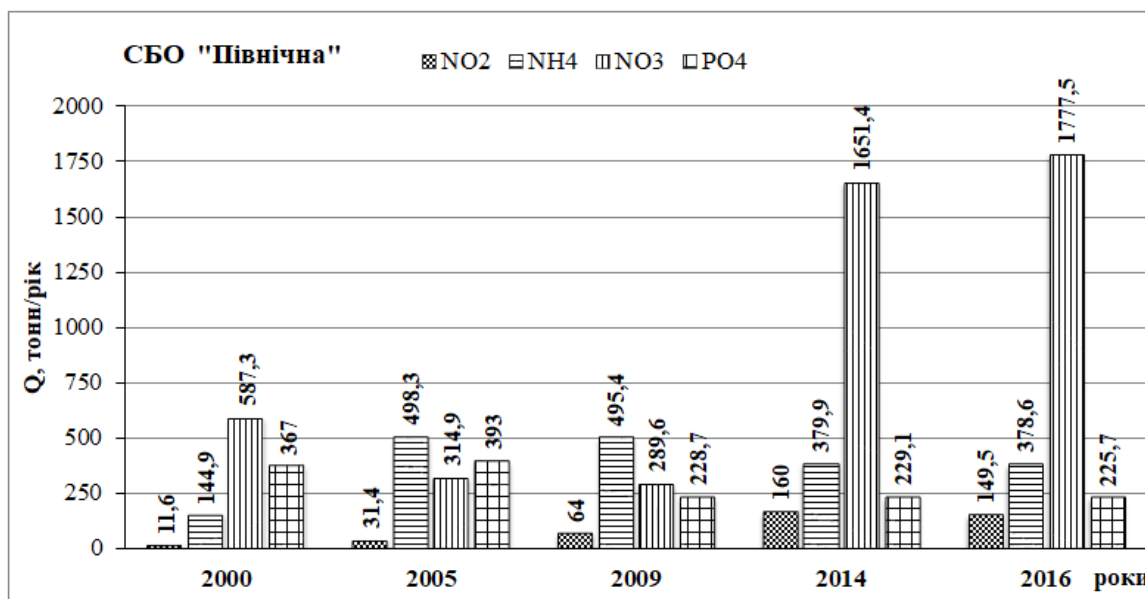


Рис. 2– Багаторічна мінливість надходження до морського середовища мінеральних сполук біогенних елементів (т/рік) з очисних споруд СБО «Північна»

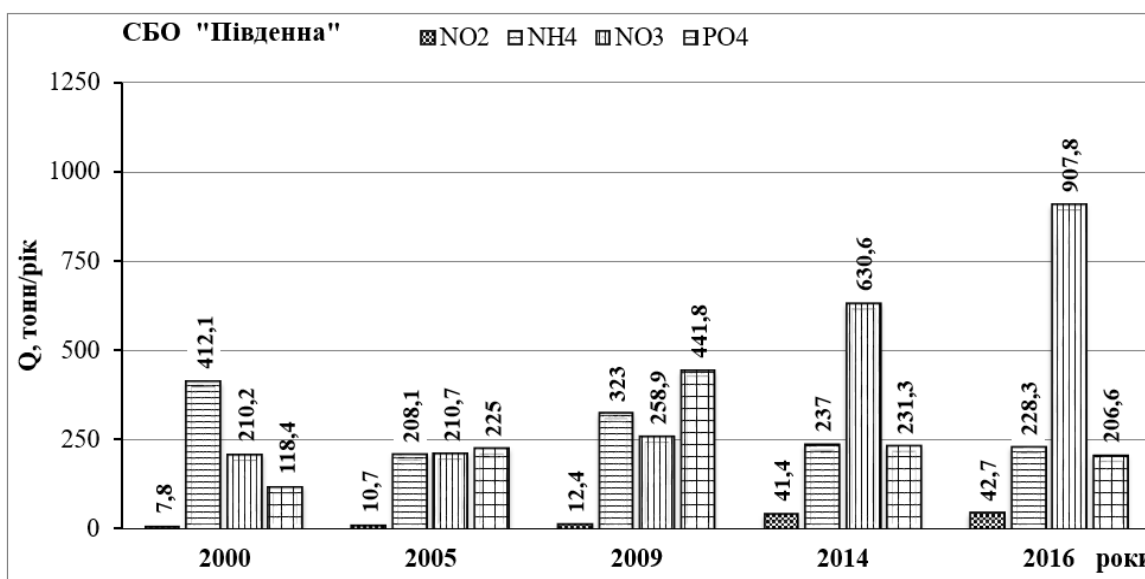


Рис. 3– Багаторічна мінливість надходження до морського середовища мінеральних сполук біогенних елементів (т/рік) з очисних споруд СБО «Південна»

#### 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Очисні споруди м. Одеси були введені в експлуатацію в 70-х роках минулого століття. На них використовується типова для того часу технологія біологічної очистки стічних вод від сполук біогенних елементів в аеротенках [8]. В них в аеробних умовах відбувається процес біохімічного окиснення органічних речовин, які містяться в стічних водах, за участю бактерій. Викорис-

тання аеротенків дозволяє досягти високого ступеня очищення стічних вод від органічних речовин, із доведенням їх вмісту в очищених стічних водах до  $\leq 15 \text{ мг/дм}^3$  за БСК<sub>повне</sub>. Відносно до трансформації сполук азоту, в аеротенках з аеробними умовами відбуваються процеси мінералізації (амоніфікації) органічного азоту та нітрифікації – мікробіологічного окислення амонію до нітритів, а потім – до нітратів. Тобто, за фактом, така технологія очищення забезпечує

трансформацію органічних і мінеральних сполук азоту в азот нітратів, які вважаються фахівцями у галузі очищення стічних вод відносно екологічно безпечними.

Згідно [6], в результаті застосування вищевказаної технології біохімічного очищення стічних вод на СБО «Північна», в період 2008-2010 рр. ефективність очищення господарсько-побутових стоків становила 82-95 % щодо органічних речовин, 72-86 % за амонійним азотом і 53-67 % щодо фосфатів. Однак на виході з очисних споруд концентрації азоту нітратів в середньому в 6-7 разів перевищували концентрації на вході, а азоту нітриту – в 5-10 разів.

На наш погляд теза про відносну екологічну безпеку скиду нітратів у морське середовище є хибною. Нітрати, навіть за відсутності амонію, здатні самостійно забезпечувати мінеральним азотом процес первинного продукування органічної речовини водоростями, тобто, у разі значних їх концентрацій у воді, призводити до інтенсифікації процесу евтрофування водних об'єктів і виникнення негативних наслідків евтрофікації, таких як бурхливе розмноження («цвітіння») планктонних водоростей, зниження прозорості води і пригнічення розвитку придонної рослинності, погіршення якості водного середовища для функціонування інших гідробіонтів, зменшення вмісту розчиненого кисню у глибинних шарах внаслідок розкладання органічної речовини мертвих рослин і тварин, а також до масової загибелі донних організмів. Під впливом евтрофікації не спрацьовують механізми, що забезпечують стійкість і стабільність екосистем і, як наслідок, різко зростають сезонні флуктуації хімічних і біологічних показників.

Згідно з оцінками індексу трофності і якості вод E-TRIX, наведеними в [9, 10], трофність прибережних вод Одеського району ПнЗЧМ в 2016, 2017 рр. на різних ділянках узбережжя відповідала категоріям «середнього», «високого» і «дуже високого» рівня. Індекс розраховується за даними відносного вмісту кисню, вмісту загального фосфору, суми мінеральних форм азоту та вмісту хлорофілу «а».

Про можливі негативні наслідки додаткового надходження нітратів до морського середовища Одеського району ПнЗЧМ і Хаджибейського лиману (до якого в останнє десятиріччя з нетривалими перервами надходили зворотні води СБО «Північна»), свідчать наступні факти. Якщо на початку ХХІ ст. співвідношення між мінеральним азотом і фосфором ( $N_{\min}:P_{\min}$ ) в прибережних водах Одеського району ПнЗЧМ складало близько 10:1 [11], то за даними [9] в 2016 р. воно

зменшилось до 6:1, а в 2017 – 3,2:1 [10]. В певній мірі це є наслідком того, що протягом ХХІ ст. вміст  $N_{\min}$  в прибережних водах Одеського району ПнЗЧМ зменшувався значно швидшими темпами ніж  $P_{\min}$  [9]. На підставі порівняння  $N_{\min}:P_{\min}$  зі стандартним стехіометричним співвідношенням Редфілда, визначеним для органічної речовини планктону як 41C:7,2N:1P (в масових одиницях або 106C:16N:1P в молярній формі), можна констатувати таке. Якщо на початку століття біогенним елементом, який міг обмежувати спалах біомаси (цвітіння) водоростей, був мінеральний фосфор, то в теперішній час цю роль виконує мінеральний азот. Отже додаткове надходження нітратів до морського середовища Одеського району з СБО може спричиняти цвітіння водоростей і призводити, за певних умов, до загострення негативних наслідків евтрофікації.

За даними гідрохімічного моніторингу в південній частині Хаджибейського лиману [12], куди здійснюється скид зворотних вод СБО «Північна», в серпні 2016 р. співвідношення між  $N_{\min}:P_{\min}$  також становило 3:1. В поверхневому шарі зони скиду з СБО спостерігались максимальні для лиману концентрації нітратів 1,629 мгN·дм<sup>-3</sup>. За сукупністю гідрохімічних показників води Хаджибейського лиману класифіковані як забрудненні, евтрофні.

З вище наведеного можна зробити висновок, що, у відношенні до очищення стічних вод від сполук азоту, технологія біологічної очистки, яка застосовується на СБО м. Одеси є незакінченою, оскільки нітратний азот після надходження до морського середовища споживається водоростями при первинному продукуванні органічної речовини, і, таким чином, знову трансформується в органічний азот. За свідченням [9, 10], в складі загального азоту в водах Одеського району значно переважає складова його органічної форми. В середньому органічні форми азоту перевищують суму мінеральних форм в 10-20 разів.

В теперішній час в країнах Європейського Економічного Співтовариства для забезпечення екологічної ефективності біологічної очистки стічних вод застосовується технологія глибокого їх очищення, яка передбачає видалення сполук азоту в процесі не тільки нітрифікації, але й денітрифікації [13, 14]. В процесі денітрифікації нітрати і нітриту відновлюються до газоподібного азоту мікробіологічним шляхом в анаеробних умовах.

Проблему денітрифікації можна вирішити, якщо відвести частину об'єму аеротенка під зону

денітрифікації, в якій створюються аноксидні умови. У світовій практиці розроблено велику кількість різних комбінацій зон денітрифікації і нітрифікації в біореакторах для очищення стічних вод від сполук азоту. Базовим варіантом є облаштування зон денітрифікації на початку аеротенка та в кінці [15].

В 2014 р. в Україні набрав чинності ДНБ В.2.5-75:2013 «Каналізація: зовнішні мережі та споруди» [16], який замінив застарілий «СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения». В ньому визначені технологічні схеми біологічної нітрифікації-денітрифікації, які повинні застосовуватись при проектуванні аеротенків.

## 5. ВИСНОВКИ

В результаті аналізу змін, які відбулись з початку ХХІ ст., встановлено, що незважаючи на значне (в 1,7-2 рази) зменшення в останнє десятиріччя обсягів зворотних вод СБО «Північна» і «Південна», річні потоки надходження з ними до морського середовища нітратів і нітритів, на відміну від амонійного азоту і фосфатів, збільшились в 4-6 разів. Це свідчить про значні технологічні проблеми з кінцевим очищенням стічних вод від сполук азоту на обох СБО, які загострились в останнє десятиліття.

Прибережні води Одеського району ПнЗЧМ і Хаджибейського лиману мають високий рівень трофності. Вперше звертається увага на те, що на відміну від початку ХХІ ст., за даними досліджень останніх років, роль біогенного елемента, який може (за інших оптимальних умов) обмежувати спалах біомаси водоростей, перейшла від мінерального фосфору до азоту, що у поєднанні зі встановленим фактом значного збільшення надходження до морського середовища мінеральних сполук азоту у формі нітритів і нітратів може, за певних умов, сприяти цвітінню водоростей і призводити до загострення негативних наслідків евтрофікації. Тому проблема впровадження сучасних технологій глибокого очищення стічних вод від сполук азоту в сучасних умовах набуває особливої актуальності.

На СБО «Північна» і «Південна» використовується застаріла і недосконала технологія біологічного очищення стічних вод, яка, у відношенні до сполук азоту, закінчується на стадії нітрифікації з утворенням нітратного азоту у великій концентрації. Для зменшення потоку надходження нітратів до морського середовища, на СБО повинна бути реалізована сучасна тех-

нологічна схема біологічної нітрифікації-денітрифікації.

Наведені результати є складовою більш комплексного дослідження, мета якого полягає у визначенні і науковому обґрунтуванні найбільш ефективних в сучасних умовах регіональних природоохоронних заходів, спрямованих на зменшення антропогенного впливу на екологічний стан вод Одеського району північно-західної частини Чорного моря.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тучковенко Ю. С., Иванов В. А., Сапко О. Ю. Оценка влияния береговых антропогенных источников на качество вод Одесского района северо-западной части Черного моря: моногр. / Морской гидрофиз. ин-т НАНУ; Од. гос. эколог. ун-т. Севастополь: ННЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 169 с.
2. Волков А. И. Анализ качества морских вод побережья Одесской агломерации. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2012. № 1-2. С. 46–50.
3. Внукова Н. В. Якість морських вод прибережної зони північно-західної частини Чорного моря. *Вестник ХНАДУ*. 2015. Вып. 70. С. 55–60.
4. Гончаров О. Ю. Антропогенний вплив станції біологічної очистки «Північна» на Одеську затоку і Хаджибейський лиман в сучасний період. *Євроінтеграція екологічної політики України*: матеріали всеукр. наук. конф., 29-31 травня, Одеса: ОДЕКУ, 2019. С. 98-102. URL: <http://odeku.edu.ua/wp-content/uploads/Zbirnik-materialiv-Ekopolitika.pdf> (дата звернення 03.05.2020)
5. Тучковенко Ю. С., Сапко О. Ю. Характеристика сбросов антропогенных источников загрязнения морских вод у побережья Одессы в современный период. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2017. Вип. 22. С. 5-13.
6. Проект предельно допустимых сбросов загрязняющих веществ, отводимых с возвратными водами предприятий филиала «Инфоксводоканал» во внутренние морские воды Черного моря и реку Днестр / ГП «Научно-исследовательский проектно-конструкторский Институт морского флота Украины». Одесса, 2010. 209 с.
7. Проект нормативів гранично допустимих скидів забруднюючих речовин, що відводяться зі зворотними водами підприємств філії "Інфоксводоканал" в Чорне море і Хаджибейський лиман / ТОВ Науково-виробниче підприємство ДОВКІЛЛЯ. Одеса, 2017.
8. Інфоксводоканал. Технологія очищення стічних вод. URL: <https://infoxvod.com.ua/uk/info/vodovidvedennia/tekhnologii-ochishchennia-stichnikh-vod> (дата звернення 26.04.2020).
9. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Одеській області у 2016 році / Департамент екології та природних ресурсів Одеської ОДА. Одеса, 2017. С. 47-54. URL: [http://ecology.odessa.gov.ua/files/ecology\\_portal/reg\\_onal\\_na\\_dopov\\_d\\_2016.pdf](http://ecology.odessa.gov.ua/files/ecology_portal/reg_onal_na_dopov_d_2016.pdf) (дата звернення 26.04.2020).
10. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Одеській області у 2017 році / Департамент екології та природних ресурсів Одеської ОДА. Одеса, 2018. С. 74-82. URL: <https://menr.gov.ua/news/31778.html> (дата звернення 26.04.2020).

26.04.2020).

11. Гидрохимический режим. Одесский регион. *Северо-западная часть Черного моря: биология и экология* / Тучковенко Ю. С., Дятлов С. Е., Рясинцева Н. И. и др.; под ред. Ю. П. Зайцева, Б. Г. Александрова. Киев : Наукова думка, 2006. С. 451-457.
12. Богатова Ю. И., Секундяк Л. Ю., Кирсанова Е. В. Качество водной среды Хаджибейского лимана летом 2016 года. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2017. Вип. 21. С. 78 - 85.
13. Юрченко В. А., Бригада Е. В., Котенко Л. Н. Экологическая опасность азотсодержащих соединений в транспортируемых и очищенных сточных водах. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2010. № 48. С. 99 - 102.
14. Рыбалова О. В. Водопостачання та водовідведення : курс лекцій / Нац. ун-т цивіл. захисту України. Харків, 2017. 195 с.
15. Маркин В. В. Возможности повышения эффективности биологической очистки сточных вод. *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. 2013. № 5(103). С. 79-84.
16. ДНБ В.2.5-75:2013. Каналізація: зовнішні мережі та споруди / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ, 2013. 128 с.
- [Project of maximum permissible discharges of pollutants discharged with the return waters of the enterprises of "Infoksvodokanal" branch into the inner waters of the Black Sea and the Dniester River]. SE "UkrSRNI". Odessa. (In Russ.)
7. Research and Production Enterprise Ltd. "DOVKILLIA". (2017). *Proekt normatyviv hranychno dopustymykh skydiv zabrudniuiuchykh rehovyn, shcho vidvodiatsia zi zvorotnymy vodamy pidpriemstv filii "Infoksvodokanal" v Chorone more i Khadzhibeyskyi lyman* [Project of the standards for maximum permissible discharges of pollutants discharged with return waters of enterprises of the "Infoksvodokanal" branch to the Black Sea and the Khadzhibey Liman]. Odessa. (in Ukr.)
8. INFOKSVODOKANAL. *Tekhnolohiia ochyshchennia stichnykh vod* [Technology of sewage treatment]. Available at: <https://infoxvod.com.ua/uk/info/vodovidvedennia/tehnolohiia-ochyshchennia-stichnykh-vod> (Accessed: 26.04.2020). (in Ukr.)
9. Department of Ecology and Natural Resources of Odessa Regional State Administration (2017). *Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Odeskii oblasti u 2016 rotsi* [Regional Report on the State of the Environment in the Odessa Region in 2016]. Odessa. Pp. 47-54. URL: [http://ecology.odessa.gov.ua/files/ecology\\_portal/reg\\_onal\\_na\\_dopov\\_d\\_2016.pdf](http://ecology.odessa.gov.ua/files/ecology_portal/reg_onal_na_dopov_d_2016.pdf) (Accessed: 26.04.2020). (in Ukr.)
10. Department of Ecology and Natural Resources of Odessa Regional State Administration (2018). *Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Odeskii oblasti u 2017 rotsi* [Regional Report on the State of the Environment in the Odessa Region in 2017]. Odessa. Pp. 74-82. URL: <https://menr.gov.ua/news/31778.html> (Accessed: 26.04.2020). (in Ukr.)
11. Tuchkovenko, Yu.S., Diatlov, S.E., Riasyntseva, N.Y. et al. (2006). *Gidrokhimicheskiy rezhim. Odesskiy region* [Hydrochemical regimen. Odessa region]. In: Zaytsev, Yu.P. and Aleksandrov, B.G. (Eds). *Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya: biologiya i ekologiya* [North-western part of the Black Sea: biology and ecology]. Kiev: Naukova dumka, pp. 32-51. (in Russ.)
12. Bogatova, Yu.I., Sekundak, L.Yu. & Kirsanova, E.V. (2017). [Quality of aquatic environment of Khadzhibeyskyi Liman in summer, 2016]. *Visnik Odes'kogo derzhavnogo ekolohichnogo universitetu* [Bulletin of Odessa state environmental university], 21, pp. 78-85.
13. Yurchenko, V., Brygada, H. & Kotenko, L. (2010). [Ecological danger of nitrogen-bearing compounds in transported and purified sewages]. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 48, pp. 99-102. (In Russ.)
14. Rybalova, O.V. (2017). *Vodopostachannia ta vodovidvedennia: kurs lektsii* [Water Supply and Drainage: A Lecture Course]. National University of Civil Defence of Ukraine. Kharkiv. (in Ukr.)
15. Markin, V. (2013). Possibilities of increasing of efficiency of the biological wastewater treatment. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 5(103), pp.79-84.
16. Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine (2013). *DBNV. 2.5-75:2013 : Kanalizatsiia: zovnishni merezhi ta sporudy* [DBNV. 2.5-75:2013 : Sewage. External networks and structures]. Kyiv. (in Ukr.)

## REFERENCES

1. Tuchkovenko, Yu.S., Ivanov, V.A. & Sapko, O.Yu. (2011). *Otsenka vliyaniya beregovykh antropogenykh istochnikov na kachestvo vod Odesskogo regiona severo-zapadnoy chasti Chernogo morya* [Assessment of the coastal anthropogenic sources impact on water quality in north-western part of Black Sea near Odessa]. Marine Hydrophysical Institute of NASU, Od. State Environmental Un-ty. Sevastopol: SPC "EKOSI-Gidrofizika" (in Russ.)
2. Volkov, A.I. (2012). Water quality assessment of Odessa agglomeration coastline. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, 1-2, pp. 46-50. (In Russ.)
3. Vnukova, N.V. (2015). Quality of marine coastal waters of the North-Western part of the Black Sea. *Bull. of the Kharkiv National Automobile and Highway University*, 70, pp. 55-60. (in Ukr.)
4. Honcharov, O.Yu. (2019). [Anthropogenic impact of the biological treatment plant "Northern" on the Odessa Bay and Hadzhibeysky estuary in the modern period]. *Materialy dopovidei Vseukrainskoi naukovoï konferentsii "Yevrointehratsiia ekolohichnoi polityky Ukrainy"* [Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Conference "European integration of Ukraine's environmental policy"], 29-31 May. Odessa: OSENU, pp. 98-10298-102. URL: <http://odeku.edu.ua/wp-content/uploads/Zbirnik-materialiv-Ekopolitika.pdf> (Accessed: 03.05.2020). (in Ukr.)
5. Tuchkovenko, Yu.S. & Sapko, O.Yu. Assessment of the coastal anthropogenic pollution sources impact on water quality in North-Western part of Black Sea near Odessa. *Visnik Odes'kogo derzhavnogo ekolohichnogo universitetu* [Bulletin of Odessa state environmental university], 2017, 22, pp. 5-13 (in Russ.)
6. State Research and Development Institute of the Merchant Marine of Ukraine (2010). *Proekt predel'no dopustymykh sbrosiv zagryaznyayushchikh veshchestv, otvodimyykh s vozvratnymi vodami predpriyatiy filiala «Infoksvodokanal» vo vnutrennie morskoe vody Chernogo morya i reku Dnestr*

## DESCRIPTION OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS OF CITY OF ODESA AS SOURCES OF MARINE ENVIRONMENT NUTRIENT POLLUTION IN CURRENT PERIOD

**Yu. S. Tuchkovenko, O. Yu. Sapko, O. A. Tuchkovenko**

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

Biological wastewater treatment plants (the BTPs) of city of Odesa (Northern and Southern Plants) are the most powerful permanent sources of nutrient pollution of coastal waters of Odesa Region of the north-western part of the Black Sea (the NWPBS) and the Khadzhybei Liman. The article includes a comparative analysis of changes, taking place since the beginning of the 21st century, related to the qualitative composition of return water of the Northern and Southern BTPs and the amount of nutrients reaching the marine environment together with such water, as well as the analysis of possible influence of such changes on eutrophication of coastal waters of Odesa Region of the NWPBS and the Khadzhybei Liman. It was established that despite significant decrease (by 1.7 - 2 times) of return water discharged from the BTPs the amount of nitrates and nitrites reaching the marine environment together with such water increased by 4-6 times. At the same time the reduced inflow of organic matter, ammonium nitrogen and phosphates can be observed.

Treatment facilities of Odesa were put into operation back in the 1970s. They use a then typical technology of biological cleaning of wastewater from nutrient compounds in aeration tanks providing aerobic conditions. The technology is considered as incomplete in terms of nitrogen compounds treatment since its final product includes nitrate nitrogen in large quantities. When reaching the marine environment it is absorbed by algae at the stage of primary production of organic matter and thus is transformed in organic nitrogen again. It was noted that since the coastal waters of Odesa Region of the NWPBS and the Khadzhybei Lyman have a high level of trophicity and currently there is a disbalance between mineral nitrogen and phosphorus concentrations in the water towards insufficiency of mineral nitrogen reserves (as compared with the standard Redfield stoichiometric ratio), additional inflow of nitrates and nitrites in the marine environment together with return water from the BTPs would, in certain circumstances, lead to algal bloom and aggravation of negative eutrophication-related consequences.

The research allowed making a conclusion that a modern flow sheet of advanced biological cleaning (treatment) of wastewater from nitrogen compounds should be implemented at the Northern and Southern BTPs in order to reduce the inflow of nitrates in the marine environment. Such flow sheet should ensure both nitrification and denitrification processes.

**Keywords:** the Black Sea, Odesa Region, water eutrophication, wastewater biological treatment, technologies

## ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНЦИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГОРОДА ОДЕССА КАК ИСТОЧНИКОВ БИОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

**Ю. С. Тучковенко, О. Ю. Сапко, О. А. Тучковенко**

*Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина,  
tuch2001@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

Станции биологической очистки (СБО) сточных вод города Одесса («Северная» и «Южная») являются самыми мощными постоянно действующими источниками биогенного загрязнения прибрежных вод Одесского района северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) и Хаджибейского лимана. В работе выполнен сравнительный анализ изменений, которые произошли с начала XXI века в качественном составе возвратных вод СБО «Северная» и «Южная» и количестве поступающих с ними в морскую среду биогенных веществ, а также возможного влияния этих изменений на эвтрофикацию прибрежных вод Одесского района и Хаджибейского лимана. Установлено, что несмотря на значительное

(в 1,7 - 2 раза) уменьшение в последнее десятилетие объемов сбросов возвратных вод с СБО, поступление с ними в морскую среду нитратов и нитритов увеличилось в 4-6 раз. В то же время поступление органического вещества, аммонийного азота и фосфатов уменьшилось.

Очистные сооружения города Одесса были введены в эксплуатацию в 70-х годах прошлого века. На них используется типичная для того времени технология биологической очистки сточных вод от соединений биогенных элементов в аэротенках в аэробных условиях, которая в отношении очистки от соединений азота является незаконченной, поскольку конечным ее продуктом является нитратный азот в больших концентрациях. После поступления в морскую среду он потребляется водорослями при первичном продуцировании органического вещества, и, таким образом, снова трансформируется в органический азот. Отмечено, что поскольку прибрежные воды Одесского района СЗЧМ и Хаджибейского лимана имеют высокий уровень трофности, а баланс между содержанием минерального азота и фосфора в их водах, по сравнению со стандартным стехиометрическим соотношением Рэдфилда, в настоящее время нарушен в сторону недостатка запасов минерального азота, то дополнительное поступление нитритов и нитратов в морскую среду с возвратными водами СБО может, при определенных условиях, способствовать цветению водорослей и приводить к обострению негативных последствий эвтрофикации.

Сделан вывод о том, что для уменьшения потока поступления нитратов в морскую среду, на СБО «Северная» и «Южная» должна быть внедрена современная технологическая схема углубленной биологической очистки сточных вод от соединений азота, которая обеспечивает реализацию не только процесса нитрификации, но и денитрификации.

**Ключевые слова:** Черное море, Одесский район, эвтрофикация вод, биологическая очистка сточных вод, технологии

Подання до редакції: 07. 05. 2020  
Надходження остаточної версії: 15. 06. 2020  
Публікація статті: 03. 07. 2020