

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 XXI 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 XXI 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 вологи 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-теплового 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-теплового 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.

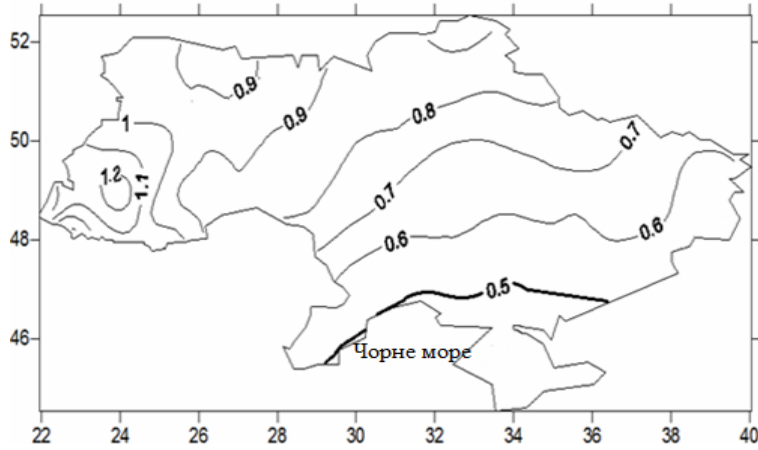
#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГРУНТОВАННЯ

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

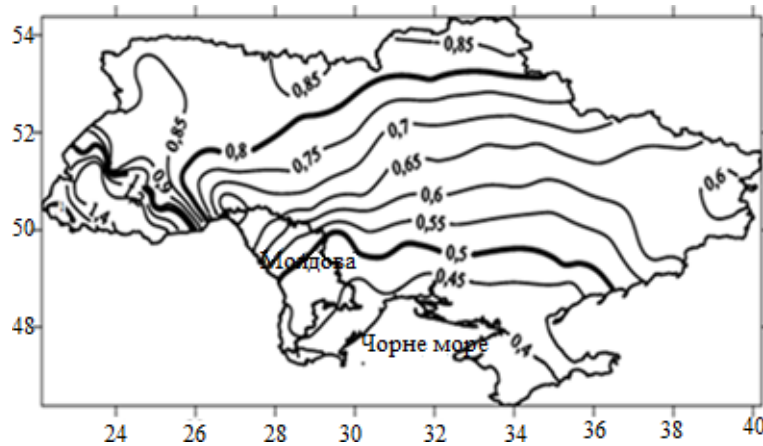
для різних кліматичних умов. Базовий стан (рис. 1) відповідає даним до початку значущих змін температури повітря на рівнинній території України (до 1989 р.). Положення ізолейн  $\beta x=0,5$ ;  $\beta x=1$  показують розташування різних кліматичних зон на території України.

За умови розвитку кліматичних змін за трак-

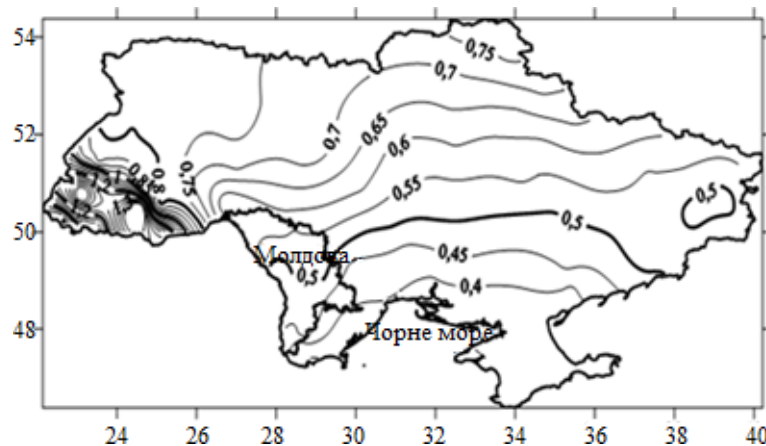
торією RCP4.5 (рис. 2) у період 2020-2050 рр. відбудеться розширення до півночі напіваридної зони ( $0,2 \leq \beta x < 0,5$ ) та зони недостатнього зволоження ( $0,5 \leq \beta x < 0,8$ ). На цьому рисунку видно, що ізолейні  $\beta x = 0,9$  та  $\beta x = 1,0$  майже "притискуються" до Українських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

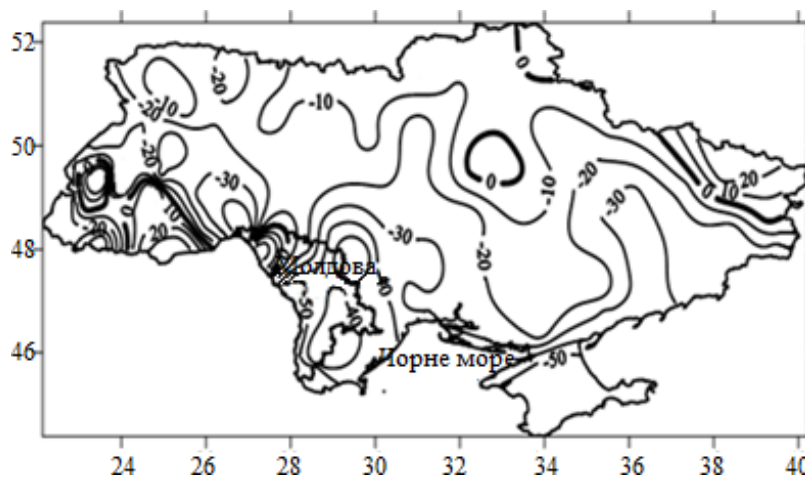


Рис. 4 – Зміни у просторі водних ресурсів (середньостатистична модель траєкторії RCP4.5) для періоду 2021-2050 рр. при порівнянні із базовими даними до 1989 р.

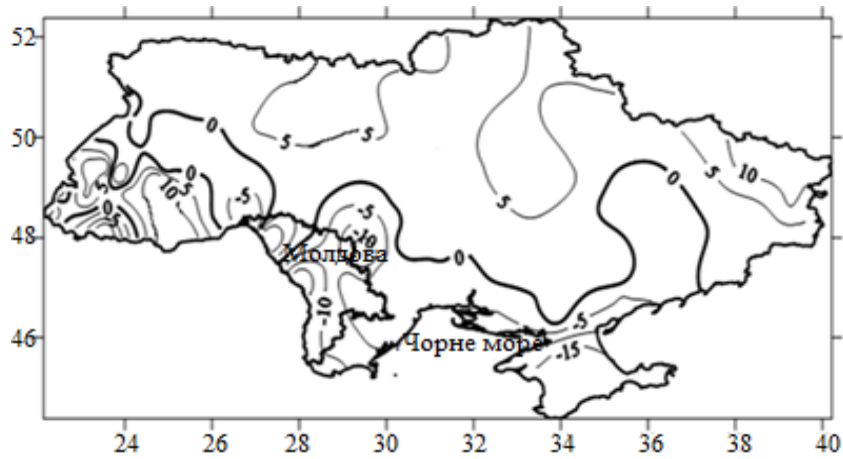


Рис. 5 – Зміни у просторі ресурсів зволоження (середньостатистична модель траєкторії RCP4.5) для періоду 2021-2050 рр. при порівнянні із базовими даними (до 1989 р.)

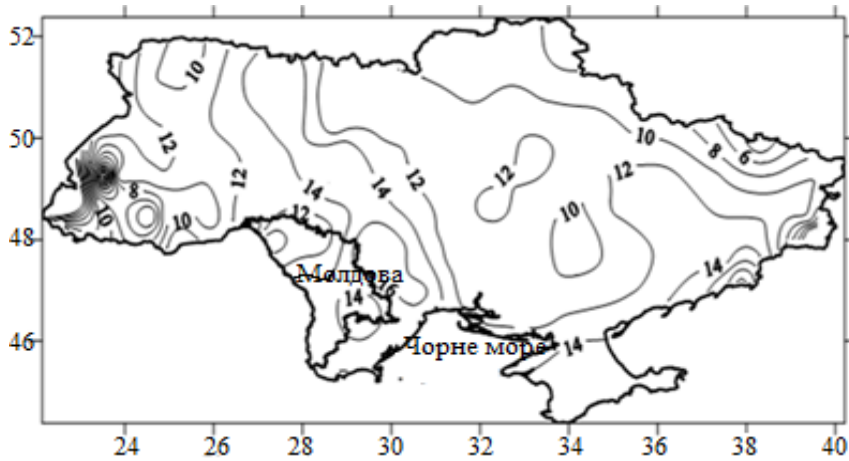


Рис. 6 – Зміни у просторі ресурсів тепла, визначених за даними траєкторії RCP4.5 (середньостатистична модель) для періоду 2021-2050 рр. при порівнянні із базовими даними до 1989 р.

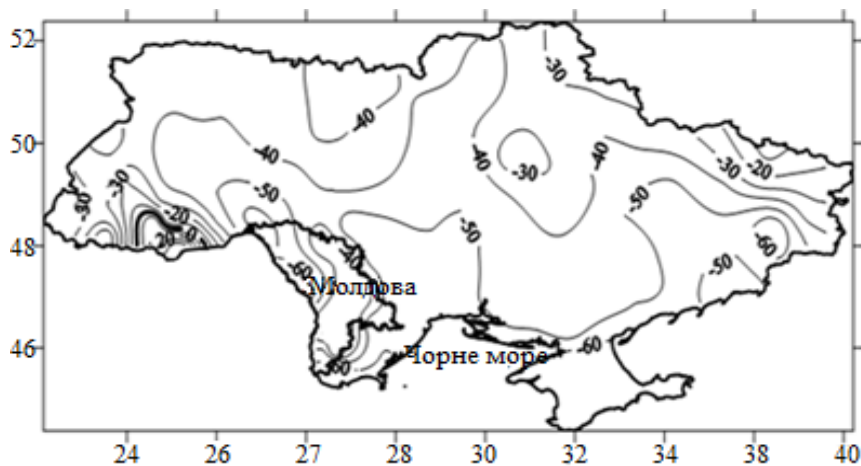
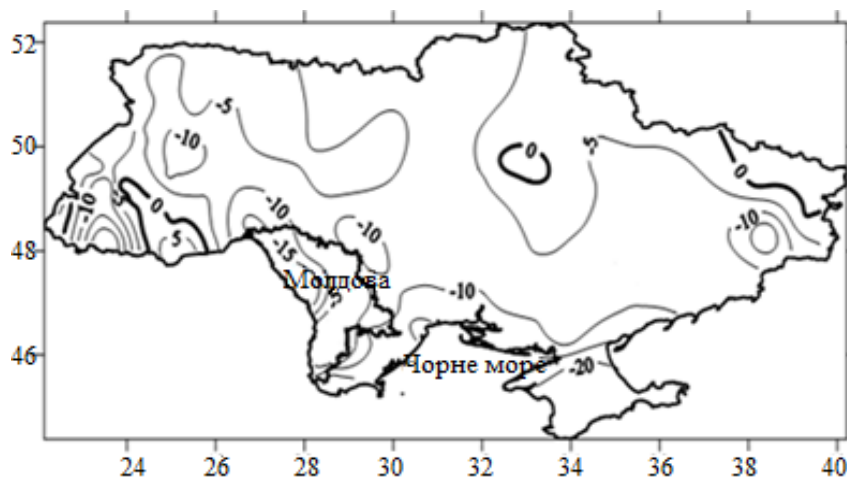


Рис. 7 – Зміни у просторі водних ресурсів (середньостатистична модель траєкторії RCP8.5) для періоду 2021-2050 рр. при порівнянні із базовими даними до 1989 р.



**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 : монографія. 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 Tyligulskiy 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 fur Meteorologie, Report, 1996. 90 p. URL: [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. 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://dspage.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/97926-08Krasovska.pdf?sequence> (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 довгостроковому 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-теплового 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. CPD.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 : монографія. 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]*. Odessa: 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 Tyligulskiy 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.nbu.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, hidrokimiia i hidroekologiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, №3 (54), pp. 80-81 (in Ukr.)
  16. Mezentsev, 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 rezhy m 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 deyatelnost'yu 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**

*Odesa State Environmental University, 15 Lvivska str., 65016, Odesa, 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