

УДК 556.531

ОЦІНКА ЗМІН ВОДНИХ РЕСУРСІВ ГІРСЬКОГО ДНІСТРА У XXI СТОРІЧЧІ ЗА СЦЕНАРІЄМ RCP8.5 НА ОСНОВІ МОДЕЛІ «КЛІМАТ-СТІК»

Н. С. Лобода, М. О. Козлов, І. В. Катинська

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

Актуальність роботи полягає в необхідності оцінки змін можливого стану водних ресурсів Гірського Дністра в результаті глобального потепління. Гірська частина басейну Дністра є зоною формування стоку і визначає водність усієї річки. Об'єктом досліджень є процес кліматичних змін та їх вплив на водні ресурси водозборів Гірського Дністра. Предметом досліджень є визначення змін водних ресурсів у сучасних та можливих у майбутньому кліматичних умовах, представлених кліматичними сценаріями.

Метою роботи є оцінка змін водних ресурсів гірської частини водозбору р. Дністер у сучасності та майбутньому до середини XXI сторіччя (2021-2050 рр.) на базі моделі «клімат-стік» з використанням даних метеорологічних спостережень (до 2018 р. включно) і сценарних даних (осереднені дані по 14 математичним моделям проекту CORDEX сценарію RCP8.5).

Виконані оцінки ресурсів зволоження, тепла (теплоенергетичного еквіваленту) та водних ресурсів для сучасних (1989-2018 рр.) та сценарних (RCP8.5, 2021-2050 рр.) кліматичних умов на основі застосування моделі «клімат-стік». Теоретичною основою розрахунків природного (непорушеного водогосподарською діяльністю) річного стоку у цій моделі є рівняння водно-теплового балансу. Вхідними даними слугують метеорологічні характеристики (середні місячні температури повітря та опади). Стік, розрахований за рівнянням водно-теплового балансу, називається кліматичним. Особливістю досліджень є використання закону вертикальної зональності у розподілі стоку та кліматичних чинників його формування. Базовою залежністю під час порівняльного аналізу слугувала залежність норм річного стоку від висоти місцевості для Гірського Дністра, наведена у сучасних нормативних документах. Ця залежність відображає розподіл стоку з висотою для кліматичних умов, які передують значущому впливу глобального потепління на температурний режим повітря (до 1989 р.).

Аналіз залежностей середніх багаторічних значень річного стоку від висоти місцевості показав, що зміни стоку за два розглянутих періоди (до та після 1989 року) знаходяться у межах $\pm 12,3\%$. Аналіз графіків хронологічного ходу річних витрат води на гірських притоках Дністра дозволив зробити висновки про відсутність статистично значущих тенденцій у їх коливаннях.

За кліматичним сценарієм RCP8.5 у період 2021-2050 рр. згідно з результатами розрахунків на базі моделі «клімат-стік» отримані залежності середніх багаторічних величин кліматичних чинників та кліматичного стоку від висоти місцевості. Виявлено, що із зростанням висоти наслідки глобального потепління зменшуються. У передгір'ї (до висоти 200 м) річні суми опадів зменшуються (до 11%), максимально можливе випаровування зростає (до 17%), водні ресурси зменшуються (до 46%). На висотах вищих за 800 м зростання ресурсів тепла та зменшення водних ресурсів припиняється. Середнє за розрахунковий період відхилення сценарних та базових значень для опадів буде становити 2,41% для опадів, 5,79% – для максимально можливого випаровування, 8,87% – для водних ресурсів. Таким чином, зменшення водних ресурсів гірської частини Дністра до середини XXI сторіччя буде несуттєвим. При оцінці сучасного стану водних ресурсів Гірського Дністра також не виявлено суттєвих змін, що відповідає даним інших авторів.

Ключові слова: вплив змін клімату на водні ресурси; модель «клімат-стік»; кліматичні сценарії; Гірський Дністер.

1. ВСТУП

Стаття присвячена оцінюванню можливих змін водних ресурсів гірської частини водозбору Дністра в результаті глобального потепління. Правобережні притоки Дністра, які беруть початок зі схилів Українських Карпат, утворюють зону формування стоку річки Дністер у цілому.

Середня та нижня течії Дністра відносяться до зони використання стоку, де внесок об'ємів води від приток у загальний стік річки Дністер незначний. У зв'язку із цим моніторинг сучасних змін водних ресурсів Гірського Дністра та їхні оцінки у майбутньому є дуже важливими для розроблення стратегії управління басейном річки у XXI сторіччі згідно із задачами Водної Рамкової Директиви [1, 2]. Серед стратегічних напрямів дій у басейні Дністра на найближчі роки (2020-2035 рр.) зазначено “пом'якшення наслідків змін клімату та природних катастроф”, а також “просування принципів раціонального використання водних ресурсів” [3]. Виявлені в ході імплементації завдань Водної Рамкової Директиви ризики недосягнення доброго екологічного статусу водних об'єктів України показали, що посилення дефіциту водних ресурсів в умовах зростання посушливості клімату може призвести до зменшення кількості та погіршенню якості вод [4] і тим самим створити екологічну небезпеку для соціуму, економіки та довкілля [5]. До числа неповністю розв'язаних задач сучасності відноситься наукове обґрунтування стану водних ресурсів гірського Дністра за даними кліматичних та гідрологічних моделей.

Об'єктом досліджень є процес кліматичних змін та їх вплив на водні ресурси водозборів. *Предметом* дослідження є визначення змін водних ресурсів у сучасних та можливих у майбутньому кліматичних умовах, представлених кліматичними сценаріями.

Метою роботи є оцінка змін водних ресурсів гірської частини водозбору р. Дністер у сучасності та до середини XXI сторіччя (2021-2050 рр.) на базі моделі «клімат-стік» з використанням даних метеорологічних спостережень й даних осередненого за 14 моделями проекту CORDEX сценарію RCP8.5.

2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У дослідженнях В.І. Вишневського та О.О. Донич [6] відзначається, що у період з 1961 по 2019 рр. середня річна температура повітря Українських Карпат зросла на 2 градуси на фоні

мало змінних опадів. Авторами встановлено, що суттєвих змін річного стоку за розглядуваний період не відбулося, що пояснюється переважаючим внеском опадів у формування стоку.

В роботі Овчарук В.А. [7] на основі використання гідрометеорологічних даних до 2010 р. включно встановлено існування стійкої тісної кореляційної залежності максимальних запасів води у сніговому покриві перед початком весняного водопілля та шарів стоку за період весняного водопілля рідкої повторюваності від середньої висоти водозборів річок Гірського Дністра.

Кількісна характеристика змін максимального стоку по десятиріччях надана в роботі вчених ЄС, включаючи Горбачову Л.О. та Овчарук В.А. [8], де показано, що на території Українських Карпат зменшення максимального стоку у середньому становить “мінус” 10-15% на десятиріччя, якщо розглядати період 1960-2010 рр.

Пошук статистично значущих трендів у коливаннях місячних максимумів стоку річок Гірського Дністра дозволив установити відсутність стійких тенденцій до їх зменшення або зростання на початку XXI сторіччя [9].

Прогнози змін водних ресурсів України на 2041-2070 рр. та 2071-2100 рр. для восьми основних басейнів України на базі шести глобальних кліматичних моделей (GHMs) сценаріїв RCP2.6 та RCP8.5 наведені в роботі [10]. У межах Українських Карпат очікується зменшення річних сум опадів у межах 10% на періоди 2041-2040 рр. та 2071-2100 рр. (сценарій RCP2.6). Для сценарію RCP8.5 очікувані зміни становитимуть “мінус” 10% у період 2041-2040 рр. та “мінус” 5% у період 2071-2100 рр. (сценарій RCP8.5). Зростання температур повітря буде знаходитися у межах 2,0-2,5 градуси для обох періодів сценарію RCP2.6. Згідно із сценарієм RCP8.5 у період 2041-2070 рр. температура повітря може зрости на 2,0-2,5 градусів, а у період 2071-2100 рр. – на 4-5 градусів. Прогноз зміни водних ресурсів наданий за математичною моделлю WaterGAP2 для річки в цілому: очікується зменшення водних ресурсів на 25% за сценарієм RCP2.6 та на 30% за сценарієм RCP8.5.

Прогнози змін регіональних паводків Прута та Тиси були надані на базі екогідрологічної моделі SWIM з використанням на вході п'ятьох моделей загальної циркуляції (GCM) для траєкторії RCP4.5 і шістьох для траєкторії RCP8.5 у роботі [11] для періоду 2070-2100 рр., який порі-

внювався із базовим періодом 1981-2010 рр. Розглядалися середні значення максимальних паводків за 30-ти річний період 98% і 95% забезпеченості. За траєкторією RCP4.5 отримані результати, які указують на збільшення рівня паводків від 4,5% до 62% у басейні Тиси, і в Пруті – від 11% до 22%. Тенденції помірного зменшення на 8-9% були виявлені лише в одному випадку з п'яти прогнозів. Для траєкторії RCP8.5 результати характеризуються більшою невизначеністю: два з шести прогнозів свідчать про зменшення (до 22%), три – про збільшення (до 93-99%), а на одному спостерігаються незначні зміни.

3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У даній роботі використані матеріали експерименту CORDEX – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, створеного Всесвітньою програмою досліджень клімату для формування ансамблю прогностичних регіональних кліматичних моделей CMIP5 [12]. Усього розглянуто 14 кліматичних моделей, в яких реалізовані траєкторії RCP8.5. Розрахунковий період становить 30 років (2021-2050 рр.). На вході у модель «клімат-стік» використані осереднені за 14 моделями метеорологічні дані (місячні та річні температури повітря та суми опадів). Застосування даних осередненої моделі дозволяє отримати осереднений варіант, у якому “нівелиються” похибки, виявлені для окремо розглянутих моделей.

Оцінки кліматичного стоку надавалися у вузлах координатної сітки, положення яких відповідає координатам метеостанцій гірської частини Дністра (загальне число дорівнює 72).

Модель «клімат-стік» складається з двох частин. Перша частина призначена для розрахунків характеристик природного (непорушеного водогосподарської діяльністю річного стоку) на базі метеорологічних даних. Теоретичною основою моделювання є рівняння водно-теплового балансу водозбору у модифікації В.С. Мезенцева [13], адаптоване для умов України [14]. Друга частина моделі «клімат-стік» призначена для моделювання побутового (перетвореного водогосподарської діяльністю) стоку. Результати застосування цієї частини моделі до розрахунків водних ресурсів України за сценаріями глобального потепління були оприлюднені у міжнародних виданнях ще наприкінці 90-х років минулого століття [15]. Теоретичною основою цієї частини моделі клімат-стік є рівняння водогосподарських балансів водозбору, які представлені у ймовірнісному виді [16].

Диференціальне рівняння водно-теплового балансу ділянки суші має такий вигляд

$$\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_{H_X}} + \frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_{H_X}} = 1, \quad (1)$$

де

$$\beta_{H_X} = \frac{H_X}{E_m}; \quad \beta_E = \frac{E}{E_m}; \quad \beta_Y = \frac{Y}{E_m}, \quad (2)$$

де H_X – характеристика ресурсів зволоження; E_m – характеристика ресурсів тепла, так званий «теплоенергетичний еквівалент» або «максимально можливе випаровування»;

E – випаровування з поверхні суші;

Y – стік з ділянки суші.

Результуюче рівняння водно-теплового балансу, отримане в результаті наближеного вирішення рівняння (1) записується у такий спосіб

$$Y = H - E_m \left[1 + \left(\frac{H}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (3)$$

де n – параметр, який інтегрує вплив фізико-географічних умов на формування стоку.

Під характеристикою зволоження H розуміють опади X , які випадають за розрахунковий період та зміни запасів вологи $w_1 - w_2$ в ґрунті $H_X = X + w_1 - w_2$.

Максимально можливе випаровування E_m визначається через прибуткові складові теплового балансу поверхні суші, через що ця характеристика випаровування отримала назву «теплоенергетичного еквіваленту». «Теплоенергетичний еквівалент» являє собою шар води, який міг би випаритися з поверхні суші, якби на процес випаровування були витрачені усі теплоенергетичні ресурси клімату

$$E_m = \frac{R^+ + P^+ + (B_1 - B_2)}{L}, \quad (4)$$

де R^+ – позитивна (прибуткова) частина радіаційного балансу; P^+ – позитивна(прибуткова) складова турбулентного теплообміну або тепло, яке надходить на ділянку суші у зв'язку з рухом повітря, тобто адвективне тепло;

$B_1 - B_2$ – зміна запасів тепла в діяльному шарі ґрунту (теплообмін у ґрунті ΔB);

L – «приховане» тепло пароутворення;

LE – витрата тепла на випаровування.

Різниця $w_1 - w_2$, яка являє собою зміну вологовмісту розрахункового шару ґрунту, приймає істотні додатні та від’ємні значення для розрахункових інтервалів часу, розглянутих у межах року. Для багаторічного періоду, коли виконується умова

$$w_1 - w_2 = 0, \quad (5)$$

є справедливим запис

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E}_m \left[1 + \left(\frac{\bar{X}}{\bar{E}_m} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (6)$$

де $\bar{Y}, \bar{X}, \bar{E}_m$ – середні багаторічні величини річного стоку, опадів та теплоенергетичного еквівалента, відповідно; n – параметр, який інтегрує вплив фізико-географічних умов на формування стоку і приймається рівним 3;

Для багаторічного періоду виконується умова

$$B_1 - B_2 = 0, \quad (7)$$

що дозволяє прийняти

$$E_m = \frac{R^+ + P^+}{L}. \quad (8)$$

Для території України через обмежену кількість актинометричних станцій Є.Д. Гопченком та Н.С. Лободою розроблена залежність середніх багаторічних величин максимально можливого випаровування від температур повітря [17]

$$\bar{E}_m = 13,3 \sum_{\nu} \frac{IX}{T_M} - 307, r = 0,94; \quad (9)$$

де \bar{E}_m – середня багаторічна величина (норма) максимально можливого випаровування;

$\sum_{\nu} \frac{IX}{T_M}$ – сума норм середніх місячних температур повітря за літній період (із травня по вересень, включно); r – коефіцієнт кореляції, який характеризує тісноту кореляційного зв’язку між значеннями максимально можливого випаровування та температурами повітря.

Норма річного стоку \bar{Y} , розрахована за (6), визначається кліматичними чинниками формування стоку – нормою річних опадів \bar{X} й

нормою максимально можливого випаровування \bar{E}_m , які підкоряються закону географічної зональності та представляються у вигляді карт ізоліній. Величини стоку, розраховані за метеорологічними даними з використанням рівнянь (3) або (6), отримали назву «кліматичного». Норма кліматичного стоку, отримана за рівнянням (6), у подальшому позначена як \bar{Y}_K . Порівняння норм річного кліматичного стоку із фактичними (спостереженими) даними для водозборів річок України із стійким підземним живленням показало задовільну узгодженість цих величин. Установлено, що норма річного кліматичного стоку є тотожною нормі зонального природного річного стоку. Точність визначення норми річного кліматичного (зонального) стоку за картою ізоліній, побудованою на основі метеорологічних даних, становить $\pm 10\%$ [18].

Метод водно-теплогового балансу був успішно використаний автором даного дослідження [19] для розроблення методики визначення середніх багаторічних величин річного стоку за метеорологічними даними для гірських територій. Нею найбільш детально була досліджена добре вивчена у гідрологічному відношенні територія гірської частини річки Дністер, яка відноситься до Прикарпатського гідрологічного району [20]. Лободою Н.С. було встановлено, що в межах цього району поле річного стоку є однорідним та ізотропним. Автокореляційний зв’язок між річним стоком суміжних років визнаний незначним: коефіцієнт автокореляції $r(1)$ дорівнює 0,149. Також було виявлено, що просторова мінливість коефіцієнту варіації C_v річного стоку на території Гірського Дністра слабо виражена і цей статистичний параметр може бути осередненим і прийнятим рівним 0,31 [14]. Для Гірського Дністра відношення коефіцієнту асиметрії до коефіцієнту варіації C_s / C_v рекомендується приймати рівним 2.

За допомогою методів багатовимірної статистичного аналізу (факторного та головних компонент) було виявлено, що оптимальним предиктором при розрахунках річного стоку з водозборів Українських Карпат є висота місцевості. Саме висота місцевості характеризується найбільш тісним кореляційним зв’язком з ваговими навантаженнями w_1 на першу компоненту розкладання полів річного стоку, яка описує найбільш масштабний фізичний процес над Карпатами [21]. Висота водозборів у даному випадку виступає інтегральним показником впливу кліматичних чинників (насамперед, опадів та

випаровування) на формування річного стоку гірських районів.

У нормативних документах для розрахунків середнього багаторічного стоку річок невивчених або недостатньо вивчених у гідрологічному відношенні гірських річок висота водозбору пропонується як головний чинник. У СНІП 2.01.14-83 [22] для Українських Карпат наведено три види залежностей норми природного річного стоку від висоти місцевості: для гірської частини басейну р. Дністер, для басейну р. Прут та басейну р. Тиси. Залежність, розроблена для гірської частини Дністра і запропонована в СНІП 2.01.14-83, може бути представлена наступним рівнянням лінійної парної регресії

$$\bar{Y} = 0,914(H_{CEP} - 200) + 95,8, \quad (10)$$

де \bar{Y} – норма річного стоку, (мм);

H_{CEP} – середня висота водозбору, (м).

За даними 72 метеорологічних станцій і постів була надана оцінка теплоенергетичних ресурсів клімату, які можуть бути представлені через теплоенергетичний еквівалент \bar{E}_m , і ресурсів зволоження у вигляді норм річних опадів. Обидві характеристики клімату підкорюються закону вертикальної зональності – норми річних опадів збільшуються у міру збільшення висоти

місцевості, а норми теплоенергетичного еквіваленту – зменшуються. Розрахункові рівняння представлені у виді

$$\bar{X} = 742 + 0,679(H - 200), r = 0,849; \quad (11)$$

$$\bar{E}_m = 777 - 0,432(H - 200), r = 0,899, \quad (12)$$

де \bar{X} – норма (середня багаторічна величина) річної суми опадів, мм; \bar{E}_m – норма (середня багаторічна величина) річного максимально можливого випаровування, мм; H – висота положення метеорологічної станції, м;

r – коефіцієнт кореляції, який характеризує тісноту лінійного зв'язку між кліматичними чинниками формування стоку та висотою розташування метеорологічної станції.

Річний кліматичний стік визначався для кожної з розглянутих метеорологічних станцій за рівнянням водно-теплогового балансу.

Отримана залежність, яка описує зміни норм річного кліматичного стоку від висоти місцевості, добре узгоджується із наведеною у СНІП 2.01.14-83 (рис. 1) [23]. Середнє відносне відхилення $|\delta_{CEP}|$ розрахованих за метеорологічними і гідрологічними даними, знаходиться у межах $\pm 10\%$.

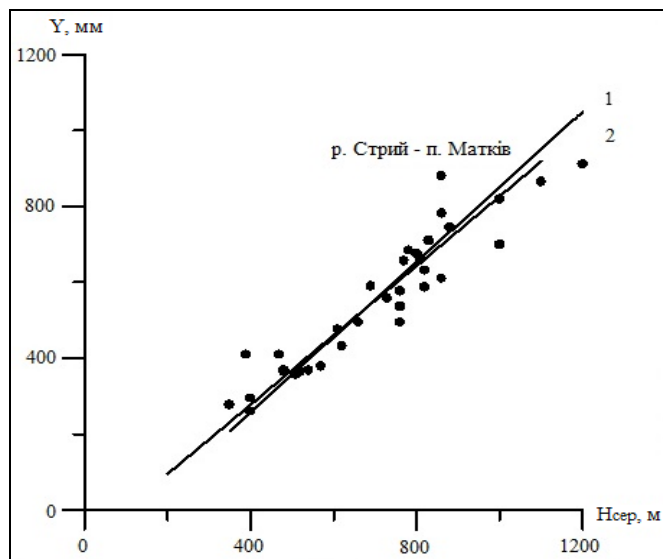


Рис. 1 – Залежність норм річного стоку від висоти місцевості для гірської частини басейну р. Дністер [23]:

1 – залежність, побудована за метеорологічними даними;

2 – залежність, наведена у СНІП 2.01.14-83;

● – дані спостережень на гідрологічних постах басейну р. Дністер до 1989 р.

Fig. 1 – Dependence of annual runoff norms on the terrain altitude for the mountainous part of the Dniester Basin:

1 – the dependence defined by meteorological data;

2 – the dependence specified in SNIP 2.01.14-83;

● – observation data at hydrological stations of the Dniester River before 1989

Таблиця 1 – Лінії регресії у коливаннях річного стоку
Table 1 – Regression lines within the annual runoff fluctuations

Річка – пост	Період спостережень, рр	Рівняння регресії	r	σ_r	Висновок
Бистриця – Озимина	1954-2018	$y = 0,0076x - 12,49$	0,142	0,123	тренд статистично незначущий
Тисмениця – Дрогобич	1950-2018	$y = 0,0136x - 23,498$	0,201	0,117	тренд статистично незначущий
Стрий – Матків	1955-2018	$y = -0,0139x + 30,375$	0,340	0,112	тренд статистично значущий
Стрий – Завадівка	1962-2018	$y = -0,0404x + 95,92$	0,215	0,129	тренд статистично незначущий
Стрий – Верхній Синьвидний	1951-2018	$y = -0,0438x + 128,95$	0,078	0,122	тренд статистично незначущий
Опор – Сколе	1957-2018	$y = -0,0944x + 200,45$	0,421	0,106	тренд статистично значущий
Славське – Славкове	1954-2018	$y = -0,0071x + 15,923$	0,264	0,117	тренд статистично значущий
Головчанка – Тухля	1955-2018	$y = 0,0088x - 14,427$	0,192	0,122	тренд статистично незначущий
Орава – Святослав	1950-2018	$y = -0,0055x + 14,493$	0,117	0,120	тренд статистично незначущий
Свіча – Зарічне	1953-2018	$y = 0,1634x - 299,51$	0,333	0,111	тренд статистично значущий
Лужанка – Гошев	1950-2018	$y = 0,0004x + 1,6775$	0,008	0,122	тренд статистично незначущий
Сукель – Тісов	1959-2018	$y = 0,0135x - 23,75$	0,307	0,119	тренд статистично значущий
Лімниця – Осмолода	1958-2018	$y = -0,0179x + 42,269$	0,210	0,124	тренд статистично незначущий
Лімниця – Перевозець	1954-2018	$y = -0,1149x + 249,95$	0,289	0,115	тренд статистично значущий
Чечва – Спас	1956-2018	$y = -0,0084x + 21,621$	0,092	0,127	тренд статистично незначущий
Луква – Боднарів	1954-2018	$y = 0,0036x - 4,7645$	0,079	0,125	тренд статистично незначущий
Бистриця Надворнянська – Пасічна	1957-2018	$y = 0,0098x - 8,801$	0,076	0,128	тренд статистично незначущий
Ворона – Тисмениця	1962-2018	$y = -0,0104x + 25,315$	0,086	0,134	тренд статистично незначущий
Бистриця Солотвинська – Гута	1950-2018	$y = 0,0163x - 29,262$	0,351	0,107	тренд статистично значущий
Бистриця Солотвинська – Івано-Франківськ	1984-2018	$y = 0,043x - 75,904$	0,108	0,172	тренд статистично незначущий

Залежність $q(H_{СЕР})$, представлена в СНІП 2.01.14-83 і виражена через шари стоку рівнянням (10), була використана як базова при оцінках змін водних ресурсів Гірського Дністра у майбутньому. Базова залежність відображає основні закономірності формування стоку досліджуваної території до початку значущих змін клімату (до 1989 р.).

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз графіків хронологічного ходу річних витрат води на гірських притоках Дністра дозво-

лив зробити висновки про відсутність статистично значущих тенденцій у їх коливаннях (табл. 1).

Рівняння лінійної парної регресії приймалися статистично значущими, якщо коефіцієнт кореляції r , який оцінює тісноту лінійного зв'язку, мав значення більше подвоєної похибки свого визначення [24], тобто:

$$r \geq 2\sigma_r, \quad (13)$$

де σ_r – середнє квадратичне відхилення вибіркового коефіцієнту кореляції.

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n - 1}}, \quad (14)$$

де n – довжина ряду.

Особливості коливань річного стоку гірських приток Українських Карпат відображені на інтегральних різницевих кривих (рис. 2). Маловодна фаза тривала від початку спостережень (50-ті роки минулого сторіччя) до 1964 року. Багатоводна фаза тривала до початку 80-х років (переважно до 1981 р.), після чого відбувся перехід у маловодну фазу, яка закінчилася у 1995 році. Багатоводна фаза тривала до 2010 року. Після 2010 року на всіх річках відбувся перехід у маловодну фазу.

Хронологічні графіки коливань річного стоку добре ілюструють існування від’ємного тренду у минуле десятиріччя (рис. 2).

Порівняльний аналіз середніх багаторічних значень річного стоку до 1989 р. та після (табл. 2) показав, що можливі відносні відхилення змінюються від “мінус” 31,1% до +21,0%. Середнє за абсолютною величиною відхилення становить ±12,3%. Дані по річці Бистриця – Надворнянська м. Івано-Франківськ не враховувалися через те, що гідрологічні спостереження розпочалися лише з 1985 р.

Розподіл середніх багаторічних величин стоку із висотою місцевості до 1989 р. (рис. 3) та після (рис. 4) практично не змінився. Після 1989 р. дещо зменшилася інтенсивність зростання стоку із висотою, що знайшло своє відображення в зменшенні коефіцієнта регресії з 0,877

до 0,820 та у зменшенні коефіцієнта кореляції з 0,875 до 0,811.

За отриманими регресійними рівняннями, наведеними на рис.3 та рис.4 були визначені середні багаторічні шари стоку за два періоди (до та після 1989-2018 рр.) для різних висот. Показано, що зміни стоку зменшуються з висотою і становлять у середньому ±6,91% (табл. 3).

Для 72 метеорологічних станцій гірської частини басейну Дністра були виконані розрахунки середніх багаторічних значень річного кліматичного стоку за період 2021-2050 рр. [25], згідно із сценарієм RCP8.5.

Розподіл опадів за сценарієм RCP8.5 (рис. 5) характеризується тим, що у передгір’ї спостерігається незначне (до -10%) зменшення річних сум опадів із висотою, а при наближенні до 1000 м, опади при порівнянні із базовим періодом зростають.

Розрахункове рівняння для річних сум опадів має вигляд

$$\bar{X} = 0,792H + 520, \quad r = 0,933 \quad (15)$$

або

$$\bar{X} = 361 + 0,792(H - 200), \quad r = 0,933. \quad (16)$$

Середнє відносне відхилення сценарних та базових значень становить ±2,41% (табл. 4). Таким чином, у Гірській зоні басейну Дністра у період 2021-2050 рр. за сценарієм RCP8.5 очікується, що ресурси зволоження не будуть змінюватися.

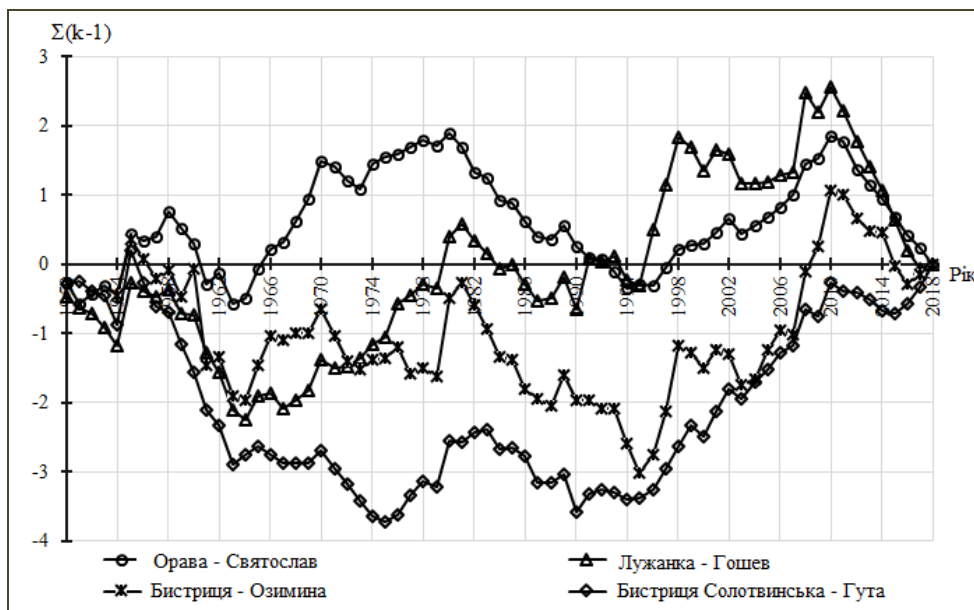


Рис. 2 – Графік різницевих інтегральних кривих для річного стоку річок Гірського Дністра
 Fig. 2 – Graph of differential integral curves for annual runoff of the rivers of the Mountain Dniester Basin

Таблиця 2 – Середній багаторічний річний стік за різні розрахункові періоди (до та після 1989 р.) для водозборів гірської частини Дністра (за даними гідрологічних спостережень)

Table 2 – Average long-term annual runoff over different estimated periods (before and after 1989) for catchment areas of the mountainous part of the Dniester River (according to hydrological observations)

Річка – пост	Шар стоку за базовий період \bar{Y} , мм до 1989 р.	Шар стоку за період кліматичних змін \bar{Y} , мм після 1989 р.	Зміни стоку, %
Бистриця – Озимица	368	414	12,4
Тисмениця – Дрогобич	418	428	2,3
Стрий – Матків	881	751	-14,8
Стрий – Завадівка	684	610	-10,8
Стрий – Верхній Синьвидний	562	492	-12,6
Опор – Сколе	610	420	-31,1
Славське – Славкове	783	666	-15,0
Головчанка – Тухля	663	754	13,7
Орава – Святослав	557	546	-2,0
Свіча – Зарічне	558	675	21,0
Лужанка – Гошев	507	466	-8,0
Сукель – Тісов	658	723	9,9
Лімниця – Осмолода	1084	944	-12,9
Лімниця – Перевозець	496	385	-22,3
Чечва – Спас	583	522	-10,5
Луква – Боднарів	389	412	6,0
Бистриця Надворнянська – Пасічна	690	688	-0,3
Ворона – Тисмениця	236	217	-7,8
Бистриця Солотвинська – Гута	818	982	20,2
Бистриця Солотвинська – Івано-Франківськ	304	440	
Середнє			±12,35

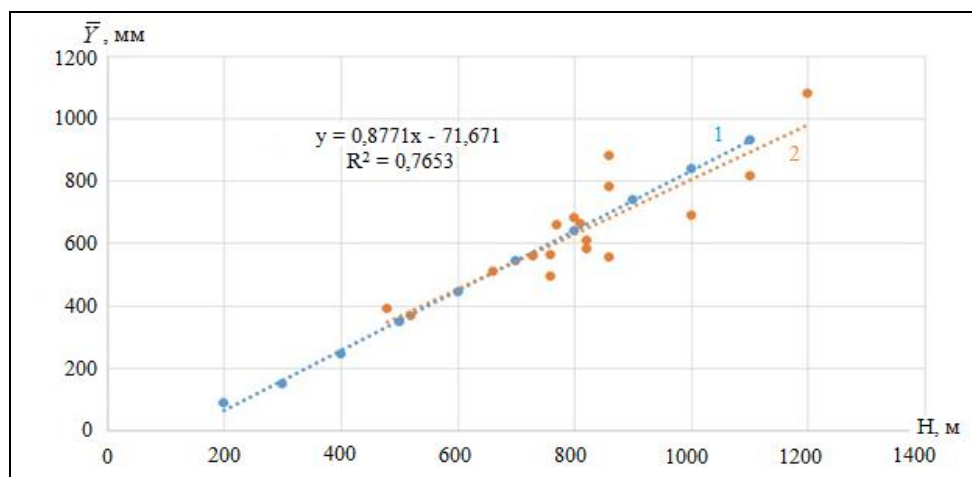


Рис. 3 – Зміна середніх багаторічних величин річного шару стоку із висотою місцевості (гідрологічні дані по водозборах за період від початку спостережень до 1989 р.):

- 1 – базова залежність (нормативний документ СНІП 2.01.14–83);
- 2 – залежність за даними спостережень до 1989 р.

Fig. 3 – Changes of average long-term values of the annual runoff depth with the terrain altitude (hydrological data across catchment areas over the period from the beginning of observations up to 1989):

- 1 – basic dependence (regulatory document SNIP 2.01.14–83);
- 2 – the dependence based on observation data before 1989.

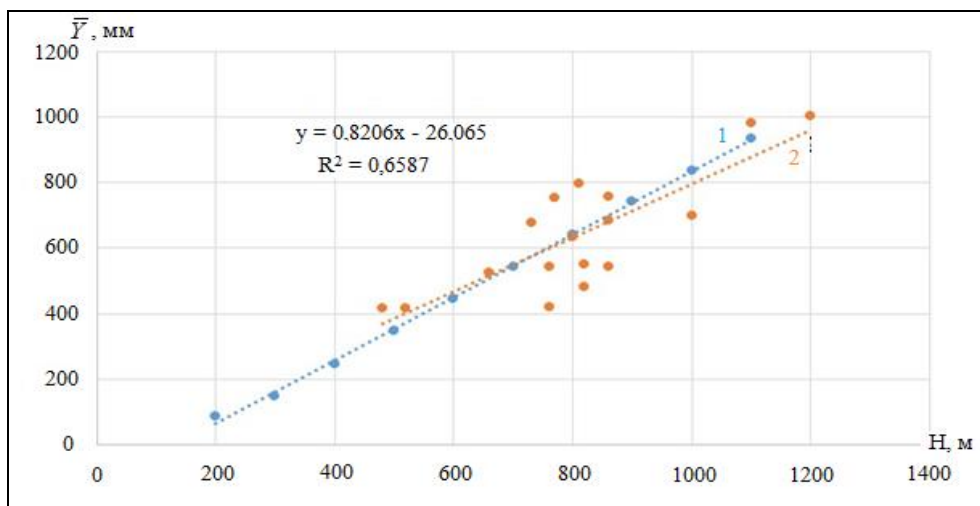


Рис. 4 – Зміна середніх багаторічних величин річного шару стоку із висотою місцевості (гідрологічні дані по водозборах 1989-2018рр.):

- 1 – базова залежність (нормативний документ СНІП 2.01.14–83);
- 2 – залежність за даними спостережень після 1989 р.

Fig. 4 – Changes of average long-term values of the annual runoff depth with the terrain altitude (hydrological data across the catchment areas over the 1989-2018 period):

- 1 – basic dependence (regulatory document SNIP 2.01.14–83);
- 2 – the dependence based on observation data after 1989

Таблиця 3 – Зміни середніх багаторічних величин річного стоку по висотних зонах, визначені за регіональними рівняннями лінійної регресії

Table 3 – Changes of average long-term values of annual runoff across the altitude zones determined by regional linear regression equations

Висота, м	\bar{Y} , мм до 1989 р.	\bar{Y} , мм (1989-2018 рр.)	Відносне відхилення розрахованих значень, %
200	104	138	-33.2
300	191	220	-15.1
400	279	302	-8.33
500	367	384	-4.81
600	455	467	-2.65
700	542	549	-1.19
800	630	631	-0.13
900	718	713	0,66
1000	805	795	1,29
1100	893	877	1.78
			Середнє значення $\pm 6,91\%$

Як видно із графіка (рис. 6) максимально можливе випаровування буде зростати на менших висотах та наблизитися до базового на висоті більшій 800 м. Розрахункове рівняння для визначення \bar{E}_m за даними за даними осередненої моделі сценарію RCP8.5 для періоду 2021-2050 рр. має вигляд

$$\bar{E}_m = 1019 - 0,619H, r = 0,945, \quad (17)$$

або

$$\bar{E}_m = 1143 - 0,619(H - 200) r = 0,945, \quad (18)$$

Середнє відносне відхилення сценарних та базових значень, становитиме $\pm 5,79\%$ (табл. 5).

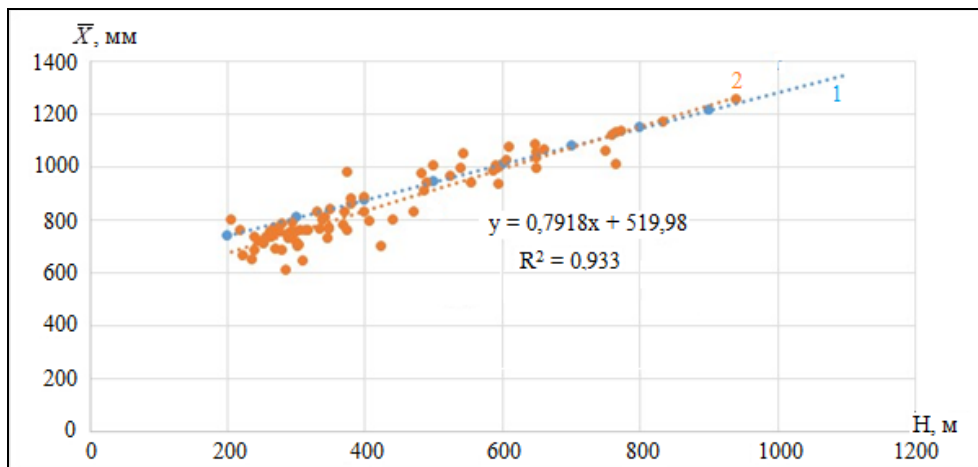


Рис. 5 – Зміна середніх багаторічних величин сум річних опадів із висотою місцевості траєкторії RCP8.5 (осереднена модель, 2021-2050 рр.) при порівнянні із базовою залежністю (до 1989 р.):

- 1 – базова залежність;
- 2 – сценарна залежність

Fig. 5 – Changes of average long-term values of total annual precipitation with the terrain altitude based on the RCP8.5 trajectory (average model, 2021-2050) compared to the baseline dependence (before 1989):

- 1 – the baseline dependence;
- 2 – the scenario dependence

Таблиця 4 – Результати порівняння базових та сценарних (RCP8.5) значень середніх багаторічних річних сум опадів (2021-2050 рр.)

Table 4 – Results of comparison of baseline and scenario (RCP8.5) values of average long-term annual precipitation amounts (2021-2050)

Висота $H, \text{ м}$	Базове значення $\bar{X}_B, \text{ мм}$	Сценарне значення $\bar{X}_C, \text{ мм}$	Відносне відхилення базових та сценарних значень $\delta = \frac{\bar{X}_C - \bar{X}_B}{\bar{X}_B} 100\%$
100	674	599	-11,12
200	742	678	-8,58
300	810	758	-6,47
400	878	837	-4,68
500	946	916	-3,15
600	1014	995	-1,83
700	1082	1074	-0,67
800	1149	1153	0,35
900	1217	1233	1,26
1000	1285	1312	2,07
			Середнє значення $\pm 2,41$

Результати розрахунку середніх багаторічних величин річного кліматичного стоку показали, що буде відбуватися його зменшення (рис. 7).

Рівняння лінійної парної регресії має вигляд

$$\bar{Y}_K = 0,912x - 92,5, \quad r = 0,996, \quad (19)$$

або

$$\bar{Y}_K = 0,912(H - 200) - 275, \quad r = 0,966, \quad (20)$$

де \bar{Y}_K – норма річного кліматичного стоку (мм).

Середнє відносне відхилення сценарних та базових значень становить – 8,87% (табл. 6), тобто знаходиться у межах точності розрахунків кліматичного стоку.

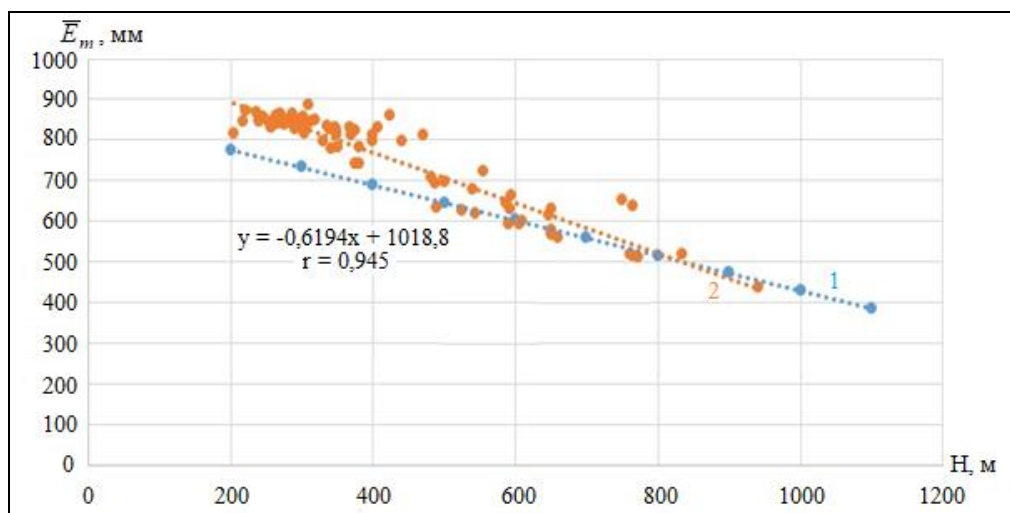


Рис. 6 – Зміна середніх багаторічних величин максимально можливого випаровування із висотою місцевості за сценарієм RCP8.5 (осереднені дані за 14 моделями, 2021-2050 рр.) при порівнянні із базовою залежністю (до 1989 р.):

- 1 – базова залежність;
- 2 – сценарна залежність

Fig. 6 – Changes of average long-term values of maximum possible evaporation with the terrain altitude based on the RCP8.5 scenario (averaged data based on 14 models, 2021-2050) compared to the baseline dependence (before 1989):

- 1 – the baseline dependence;
- 2 – the scenario dependence

Таблиця 5 – Результати порівняння базових та сценарних (RCP8.5) середніх багаторічних значень максимально можливого випаровування (2021-2050рр.)

Table 5 – Results of comparison of baseline and scenario (RCP8.5) values of average long-term annual maximum possible evaporation (2021-2050)

Висота Н, м	Базове значення \bar{E}_{mB} , мм	Сценарне значення \bar{E}_{mC} , мм	Відносне відхилення базових та сценарних значень $\delta = \frac{\bar{E}_{mC} - \bar{E}_{mB}}{\bar{E}_{mB}} \cdot 100\%$
100	820	957	16,7
200	777	895	15,2
300	734	833	13,5
400	691	771	11,6
500	647	709	9,5
600	604	647	7,1
700	561	585	4,3
800	518	523	1,1
900	475	461	-2,8
1000	431	399	-7,4
			Середнє значення $\pm 5,79$

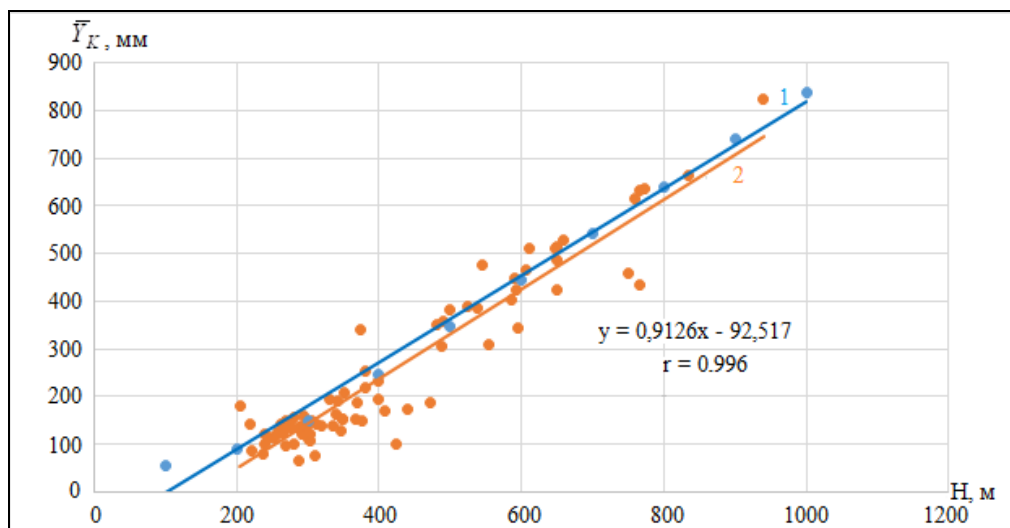


Рис. 7 – Зміна середніх багаторічних величин річного кліматичного стоку із висотою місцевості траєкторії RCP8.5 (осереднена модель, 2021-2050рр.) при порівнянні із базовою залежністю:

- 1 – базова залежність;
- 2 – сценарна залежність.

Fig. 7 – Changes of average long-term values of annual climatic runoff with the terrain altitude based on the RCP8.5 trajectory (averaged model, 2021-2050) when compared to the baseline dependence:

- 1 – the baseline dependence;
- 2 – the scenario dependence.

Таблиця 6 – Результати порівняння базових та сценарних (RCP8.5) значень середніх багаторічних значень кліматичного стоку (2021-2050 рр.) за рівнянням лінійної регресії

Table 6 – Results of comparison of baseline and scenario (RCP8.5) values of average long-term values of annual climatic runoff (2021-2050) based on the linear regression equation

Висота H, м	Базове значення \bar{Y}_{KB} , мм	Сценарне значення \bar{Y}_{KC} , мм	Відносне відхилення базових та сценарних значень $\delta = \frac{\bar{Y}_{KC} - \bar{Y}_{KB}}{\bar{Y}_{KB}} \cdot 100\%$
100	57	-	-
200	88	48	-45,9
300	148	142	-4,11
400	246	237	-3,85
500	347	331	-4,61
600	445	425	-4,36
700	542	520	-4,20
800	640	614	-4,09
900	741	708	-4,41
1000	839	803	-4,30
			Середнє значення -8,87%

5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Особливістю запропонованого підходу до оцінки змін водних ресурсів гірської частини Дністра є використання закономірностей вертикальної зональності розподілу річного стоку та кліматичних чинників його формування у гірсь-

кій місцевості. Перевагою запропонованого підходу до оцінок водних ресурсів майбутнього на базі метеорологічних даних сценаріїв є те, що у розрахунках використані осереднені за 14 математичними моделями сценарію RCP8.5 дані. На відміну від результатів розрахунків, наведених у роботі і представлених у вигляді

карт ізоліній [25], використання залежностей кліматичних чинників та стоку від висоти місцевості дозволяє уникнути похибок, обумовлених швидкою зміною градієнту температур та опадів із висотою місцевості, що не завжди знаходить своє відображення у просторовому розподілі згладжених ізоліній.

Алгоритм розрахунків середніх багаторічних значень річного кліматичного стоку за заданий розрахунковий період наступний.

1. За розрахунковий період визначаються середні багаторічні величини річних сум опадів, максимально можливого випаровування та річного кліматичного стоку за даними метеостанцій або вузлів сітки при розгляді сценаріїв.

2. На базі отриманих результатів будуються графіки залежності кліматичних чинників та річного стоку від висоти місцевості. За допомогою регресійного аналізу установлюють регресійні рівняння, які описують вертикальний розподіл характеристик у заданих кліматичних умовах.

3. На основі отриманих регресійних рівнянь визначаються зміни у вертикальному розподілі досліджуваних характеристик та відносні відхилення сценарних і базових даних. У виконаній роботі як базова використана залежність норм річного стоку річок гірської частини Дністра від висоти місцевості, наведена у нормативних документах 1986 року видання).

Результати оцінок змін водних ресурсів гірського Дністра за кліматичним сценарієм RCP8.5 підтверджуються дослідженнями інших авторів (дивись розділ 2). Прогнозоване зменшення водних ресурсів гірської частини Дністра до середини XXI сторіччя буде несуттєвим. Оцінки сучасного стану її водних ресурсів також не виявили суттєвих змін.

6. ВИСНОВКИ

У коливаннях річного стоку річок Гірського Дністра виділяються наступні фази: 1965-1981 рр. (багатоводна фаза); 1982-1995 рр. (маловодна фаза); 1996-2009 рр. (багатоводна фаза); 2010-2018 рр. (маловодна фаза).

Аналіз графіків хронологічного ходу річних витрат води на гірських притоках Дністра дозволив зробити висновки про відсутність статистично значущих тенденцій у їх коливаннях

Аналіз залежностей середніх багаторічних значень річного стоку від висоти місцевості до та після 1989 року (1989-2018 рр.) показав, що вони відповідають наведений у нормативному

документі СНП 2.01.14-83 залежності. Оцінки змін стоку за два розглянутих періоди, виконані для 20 водозборів Гірського Дністра знаходяться у межах $\pm 12,3\%$. Підчас розгляду цих змін по висотах (за побудованими регіональними залежностями) виявлено, що розбіжності змешуються із зростанням висоти місцевості.

За осередненою моделлю RCP8.5 у період 2021-2050 рр. за результатами розрахунків на базі моделі «клімат-стік» з використанням осереднених за 14 моделями проекту CORDEX очікується у передгір'ї (до висоти 200 м) зменшення річних сум опадів (до 11%), зростання максимально можливого випаровування (до 17%), зменшення водних ресурсів (до 46%). На висотах вищих за 800 м зростання ресурсів тепла та зменшення водних ресурсів припиняється. Середнє за розрахунковий період відхилення сценарних та базових середніх багаторічних значень для опадів буде становити 2,41% для опадів, 5,79% – для максимально можливого випаровування, 8,87% – для водних ресурсів. Таким чином, зменшення водних ресурсів гірської частини Дністра до середини XXI сторіччя буде несуттєвим. При оцінці сучасного стану водних ресурсів Гірського Дністра також не виявлено суттєвих змін, що відповідає даним інших авторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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 : 02.11.2021)
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. 72 p.
3. Стратегическая программа действий для бассейна реки Днестр. Кишинев – Киев, 2020. 65с.
4. Проект Стратегія розвитку водної політики України - Водна Стратегія. URL: <https://mepr.gov.ua/news/37578.html> (дата звернення : 02.11.2021)
5. Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року. (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2021 р. № 1363-р). URL: <https://mepr.gov.ua/news/38362.html> (дата звернення : 02.11.2021)
6. Vyshnevskiy V. I., Donich O. A. Climate change in the Ukrainian Carpathians and its possible impact on river runoff. *Acta Hydrologica Slovaca*. 2021. 22(1). Pp. 3-14.
7. Овчарук В. А., Гопченко Є. Д., Траскова А. В. Нормування характеристик максимального стоку весняного водпілля в басейні річки Дністер: моногр. Харків: ФОП

- Панов А.М., 2017. 252 с.
8. Changing climate both increases and decreases European river floods / Blöschl G., Hall J., Viglione A. et al. *Nature*. 2019. № 573. Pp. 108-111.
 9. Melnyk S., Loboda N. Trends in monthly, seasonal and annual fluctuations in flood peaks for upper Dniester River Meteorology, Hydrology and Water Management. *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2020. Vol. 8(2). Pp. 28-36.
 10. Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine / Didovets I., Krysanova V., Hattermann F. F. et al. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. № 32. Pp. 1-13
 11. Climate change impact on regional floods in the Carpathian region / Didovets I. et al. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2019. № 22. Pp. 1-14.
 12. 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.
 13. Мезенцев В. С., Карнаевич И. В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 75 с.
 14. Лобода Н. С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния: монография. Одесса: Экология, 2005. 208 с.
 15. Loboda N. S. The assessment of present and future Ukrainian water resources on meteorological evidence. *Climat and Water*. 1998. Vol. 1. Pp. 1486-1494.
 16. Loboda N. S., Phan Van Chinnh. Statistical modelling and estimating the irrigation and man-made effect on annual runoff and water resources. *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment: proceedings of ICGRHWE held Tree Gerges Dam, Chine*. 2004. IAHS Publication 289 in the IAHS Series of Proceedings and Reports. Pp. 215-218.
 17. Гопченко Е. Д., Лобода Н. С. Оценка возможных изменений водных ресурсов Украины в условиях глобального потепления. *Гидробиологический журнал*. 2000. Т. 36, № 3. С. 67-78.
 18. Лобода Н. С. Проблемы гидрологических расчетов в условиях антропогенного воздействия и модель "климат-сток". *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. 2007. Вип. 50. Ч. 2. С. 14-19.
 19. Лобода Н. С. Методические подходы к оценке естественных водных ресурсов горных районов на основе метеорологической информации (на примере горной части бассейна р.Днестр). *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. 2002. № 45. С. 118-124.
 20. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т.6. Украина и Молдавия. Вып. 1. Западная Украина и Молдавия / под ред. Б.М. Штейнгольца. Ленинград, 1964. 245 с.
 21. Лобода Н. Виділення основних стокоформуючих факторів на основі аналізу структури полів річного стоку за допомогою методу головних компонент (на прикладі річок верхнього Дністра до м. Могилів-Подільський). *Науковий Вісник Чернівецького університету*. 2003. № 167. С. 107-112.
 22. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик / под ред. А.В. Рождественского, А.Г. Лобановой. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 447 с.
 23. Лобода Н. С. Ландшафтна різноманітність та районування характеристик стоку Українських Карпат. *Науковий Вісник Чернівецького університету*. 2006. № 305. С. 12-19.
 24. Рождественский А. В., Ежов А. В., Сахарюк А. В. Оценка точности гидрологических расчетов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. 276 с.
 25. 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. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. № 25. С. 93-104. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.09>

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: 02 November 2021) (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. *Strategicheskaya programma deystviy dlya baseyna r. Dnestr. Kishinev – Kyiv [Strategic Action Programme for the Dniester River Basin. Chisinau – Kiev]. (2020). (in Russ.)*
4. *Proekt Stratehiia rozvytku vodnoi polityky Ukrainy - Vodna Stratehiia [Project Strategy for the Development of Water Policy of Ukraine – Water Strategy]. (2021). URL: <https://mepr.gov.ua/news/37578.html> (Accessed: 02 November 2021) (in Ukr.)*
5. *Stratehiia ekolohichnoi bezpeky ta adaptatsii do zminy klimatu na period do 2030 roku. (skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 20 zhovtnia 2021 r. № 1363-r) [Strategy for environmental safety and adaption to climate change until 2030 (the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 20, 2021 No. 1363-r)]. URL: <https://mepr.gov.ua/news/38362.html> (Accessed: 02 November 2021) (in Ukr.)*
6. Vyshnevskiy, V.I. & Donich, O.A. (2021). Climate change in the Ukrainian carpathians and its possible impact on river runoff. *Acta Hydrologica Slovaca*, 22(1). Pp. 3-14.
7. Ovcharuk, V.A., Hopchenko, Ye.D. & Traskova, A.V. (2017). *Normuvannia kharakterystyk maksimalnoho stoku vesnianoho vodopillia v baseini richky Dnister [Rationing of the characteristics of the maximum runoff the spring flood in the Dniester River basin]*. Kharkiv: FOP Panov Publ. (in Ukr.).
8. Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A. et al. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573, pp. 108-111.
9. Melnyk, S. & Loboda, N. (2020). Trends in monthly, seasonal and annual fluctuations in flood peaks for upper Dniester River Meteorology, Hydrology and Water Management. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 8 (2), pp. 28-36.
10. Didovets, I. et al. (2020). Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, pp. 1-13
11. Didovets, I. et al. (2019). Climate change impact on regional floods in the Carpathian region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22, pp. 1-14.
12. 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.
13. Mezentsev, V.S. & Karnatsevich, I.V. (1969). *Uvlazhnennost' Zapadno-Sibirskoy ravniny [Humidity of the West Siberian plain]*. Gidrometeoizdat (in Russ.).
 14. Loboda, N.S. (2005). *Raschety i obobshcheniya kharakteristik godovogo stoka rek Ukrainy v usloviyakh antropogennoho vliyaniya [Calculations and generalizations of characteristics of annual runoff of rivers of Ukraine in the conditions of anthropogenic influence]*. Odessa: Ecology. (in Russ.)
 15. Loboda, N.S. (1998). The assessment of present and future Ukrainian water resources on meteorological evidence. *Climat and Water*, 1, pp. 1486-1494.
 16. Loboda, N.S. & Phan Van Chinnh. (2004). Statistical modelling and estimating the irrigation and man-made effect on annual runoff and water resources. *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment*: proceedings of ICGRHWE held Tree Gerges Dam, Chine. IAHS Publication 289 in the IAHS Series of Proceedings and Reports, pp. 215-218.
 17. Gopchenko, E.D. & Loboda, N.S. (2000). Otsenka vozmoznykh izmeneniy vodnykh resursov Ukrainy v usloviyakh global'nogo potepneniya [Evaluation of possible changes in water resources of Ukraine in conditions of global warming]. *Gidrobiologicheskij zhurnal [Hydrobiological journal]*, 36 (3), pp. 67-78. (in Russ.).
 18. Loboda, N.S. (2007). Problemy gidrologicheskikh raschetov v usloviyakh antropogennoho vozdeystviya i model' "klimat-stok" [Problems of hydrological calculations under anthropogenic impact and the "climate-runoff" model]. *Meteorologiya, klimatologiya ta hidrolologiya [Meteorology, Climatology and Hydrology]*, 50(2), pp. 14-19. (in Russ.)
 19. Loboda, N.S. (2002). Metodicheskie podkhody k otsenke estestvennykh vodnykh resursov gornyykh rayonov na osnove meteorologicheskoy informatsii (na primere gornoy chasti basseyna r.Dnestr) [Methodological approaches to the assessment of natural water resources in mountainous regions based on meteorological information (on the example of the mountainous part of the Dniester river basin)]. *Meteorologiya, klimatologiya ta hidrolologiya [Meteorology, Climatology and Hydrology]*, 45, pp. 118-124. (in Russ.)
 20. Shteyngol'ts, B.M. (ed.) (1964). *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost. Ukraina i Moldaviya. T. 6. Vyp. 1. [Resources of surface waters of the USSR. Hydrological knowledge. Ukraine and Moldova. Vol. 6. Issue 1]*. Leningrad. (in Russ.)
 21. Loboda, N. (2003). Vydilennia osnovnykh stokoformuiuchykh faktoriv na osnovi analizu struktury poliv richnoho stoku za dopomohoiu metodu holovnykh komponent (na prykladi richok verkhnoho Dnistra do m. Mohyliv-Podil'skyi) [Selection of the main stock-forming factors on the basis of the analysis of structure of fields of annual runoff by means of a method of the main components (on an example of the rivers of the top Dniester to Mogilev-Podolsky)]. *Naukovyi Visnyk Chernivetskoho universytetu [Scientific Bulletin of Chernivtsi University]*, 167, pp. 107-112. (in Ukr.)
 22. Rozhdestvenskiy, A.V. & Lobanova, A.G. (1984) *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik [Manual for the definition of estimated hydrological characteristics]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
 23. Loboda, N.S. (2006). Landshaftna riznomanitnist ta raionuvannia kharakterystyk stoku Ukrainskykh Karpat [Landscape diversity and zoning of runoff characteristics of the Ukrainian Carpathians]. *Naukovyi Visnyk Chernivetskoho universytetu [Scientific Bulletin of Chernivtsi University]*, 305, pp. 12-19. (in Ukr.)
 24. Rozhdestvenskiy, A.V., Ezhov, A.V. & Saharyuk, A.V. (1990). *Otsenka tochnosti gidrologicheskikh raschetov [Assessment of the accuracy of hydrological calculations]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
 25. Loboda, N.S. & Kozlov, M.O. (2000). Otsinka vodnykh resursiv richok Ukrainy za serednimy statystychnymy modeliyamy traektorii zmin klimatu RCP4.5 ta RCP8.5 u period 2021-2050 roky [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]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal. [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 25, pp. 93-104. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.09> (in Ukr)

EVALUATION OF WATER RESOURCES CHANGES OF THE MOUNTAIN DNIESTER IN 20TH CENTURY FOLLOWING THE RCP8.5 SCENARIO AND BASED ON THE "CLIMATE-RUNOFF" MODEL

N. S. Loboda, M. O. Kozlov, I. V. Katynska

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

The relevance of the research consists in the need for evaluating the water resources changes of the Dniester due to global warming. The mountain part of the Dniester Basin is a zone of the river's runoff formation that determines its water content. The subject of research includes a process of climate changes and their impact on the water resources of the Mountain Dniester's catchments. The research focuses on determining the water resources changes under current and possible future climatic conditions represented by climatic scenarios.

The research aims at evaluating the water resources changes of the mountain part of the

Dniester's catchment area at the present and in the future by the mid-21 st century (2021-2050) based on the "climate-runoff" model using meteorological observations data (up to 2018 inclusive) and scenario data (averaged data based on 14 mathematical models of the CORDEX project, RCP8.5 scenario).

During the research the resources of humidification, heat (heat equivalent) and water content for modern (1989-2018) and scenario (RCP8.5, 2021-2050) climatic conditions based on application of the "climate-runoff" model were evaluated. The theoretical basis for estimating the natural (undisturbed by water management) annual runoff in this model is represented by the water-heat balance equation. The meteorological characteristics (average monthly air temperatures and precipitation) serve as input data. The runoff calculated using the water-heat balance equation is called a climatic runoff. One of the peculiarities of the research consists in the use of the vertical zoning law with respect to distribution of runoff and climatic factors of its formation. During the comparative analysis the dependence of annual runoff norms on height of the Mountain Dniester's terrain specified in modern regulatory documents served as a basic dependence. Such dependence reflects an altitude-dependant distribution of runoff for the climatic conditions that preceded the significant impact of global warming on air temperature (until 1989).

The analysis of the dependences of average long-term values of the annual runoff depending on the terrain altitude showed that the runoff changes for two studied periods (before and after 1989) are within $\pm 12,3\%$. The analysis of the graphs of chronological course of annual water flow of the mountain tributaries of the Dniester made it possible to confirm the absence of statistically significant trends in their fluctuations.

According to the RCP8.5 climate scenario over the period of 2021-2050 and following the results of calculations based on the "climate-runoff" model, the dependences of the average long-term altitude-related values of climatic factors and climatic runoff were retrieved. It was found that the effects of global warming decrease with increasing altitude. In the foothills (up to 200 m) the annual precipitation decreases (up to 11%), the maximum possible evaporation increases (up to 17%) and water resources decrease (up to 46%). Heat resources cease to increase and water resources cease to reduce at the altitudes over 800 m. The average deviation of the scenario and baseline values for precipitation over the estimated period will amount to 2.41% for precipitation, 5.79% for maximum possible evaporation and 8.87% for water resources. Thus, reduction of water resources in the mountainous part of the Dniester by the mid-21 st century will be insignificant. When evaluating the current state of water resources of the Mountain Dniester no significant changes were discovered, thereby not contradicting the other authors' data.

Keywords: impact of climate changes on water resources, "climate-runoff" model, climate scenarios, the Mountain Dniester.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ГОРНОГО ДНЕСТРА В XXI СТОЛЕТИИ ПО СЦЕНАРИЮ RCP8.5 НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ «КЛИМАТ-СТОК»

Н. С. Лобода, М. А. Козлов, И. В. Катинская

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

Актуальность работы заключается в необходимости оценки изменений возможного состояния водных ресурсов Горного Днестра в результате глобального потепления. Горная часть бассейна Днестра является зоной формирования стока и определяет водность всей реки. Объектом исследований является процесс климатических изменений и их влияние на водные ресурсы водосборов Горного Днестра. Предметом исследований является определение изменений водных ресурсов в современных и возможных в будущем климатических условиях, представленных климатическими сценариями.

Целью работы является оценка изменений водных ресурсов горной части водосбора р. Днестр в современности и в будущем до середины XXI столетия (2021-2050 гг.) на базе модели «климат-сток» с использованием данных метеорологических наблюдений (до 2018 г. включительно) и сценарных данных (осредненные данные по 14 математическим моделям CORDEX сценария RCP8.5).

Выполнены оценки ресурсов увлажнения, тепла (теплоэнергетического эквивалента) и

водных ресурсов для современных (1989-2018 гг.) и сценарных (RCP8.5, 2021-2050 гг.) климатических условий на основе использования модели «климат-сток». Теоретической основой расчетов природного (не нарушенного водохозяйственной деятельностью) годового стока в этой модели является уравнение водно-теплового баланса. Входными данными служат метеорологические характеристики (средние месячные температуры воздуха и осадки). Сток, рассчитанный по уравнению водно-теплового баланса, называется климатическим. Особенностью исследований является применение закона вертикальной зональности в распределении стока и климатических факторов его формирования. Базовой зависимостью во время сравнительного анализа служила зависимость норм годового стока от высоты местности для Горного Днестра, приведенная в современных нормативных документах. Эта зависимость отображает распределение стока с высотой для климатических условий, предыдущих значимому влиянию глобального потепления на температурный режим воздуха (до 1989 г.).

Анализ зависимостей средних многолетних значений годового стока от высоты местности показал, что изменения стока за два рассматриваемых периода (до и после 1989 года) находятся в пределах $\pm 12,3\%$. Анализ графиков хронологического хода годовых расходов воды на горных притоках Днестра позволил сделать выводы об отсутствии статистически значимых тенденций в их колебаниях.

По климатическому сценарию RCP8.5 в период 2021-2050 гг. в соответствии с результатами расчетов на базе модели «климат-сток» получены зависимости средних многолетних величин климатических факторов и климатического стока от высоты местности. Выявлено, что с увеличением высоты последствия глобального потепления уменьшаются. В предгорье (до высоты 200 м) годовые суммы осадков уменьшаются (до 11%), максимально возможное испарение увеличивается (до 17%), водные ресурсы уменьшаются (до 46%). На высотах более 800 м увеличение ресурсов тепла и уменьшение водных ресурсов заканчивается. Среднее за расчетный период отклонение сценарных и базовых значений для осадков будет составлять 2,41% для осадков, 5,79% – для максимально возможного испарения, 8,87% – для водных ресурсов. Таким образом, уменьшение водных ресурсов горной части Днестра до середины XXI столетия будет несущественным. При оценке современного состояния водных ресурсов Горного Днестра также не выявлено существенных изменений, что соответствует данным других авторов.

Ключевые слова: влияние изменений климата на водные ресурсы; модель «климат-сток»; климатические сценарии; Горный Днестр.

Подання до редакції: 15. 11. 2021
Надходження остаточної версії : 21. 11. 2021
Публікація статті : 26. 11. 2021