

УДК 556.165

DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2020.02.020>**С.І.Сніжко¹, О.Г.Ободовський¹, О.Г.Шевченко¹, В.В.Гребін¹, Ю.С.Дідовець²,
І.В.Купріков¹, О.О.Почасвець¹**¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна²Потсдамський Інститут досліджень впливу на клімат, Німеччина

РЕГІОНАЛЬНА ОЦІНКА ЗМІНИ ВОДНОГО СТОКУ РІЧОК УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ ПІД ВПЛИВОМ ЗМІНИ КЛІМАТУ

Мета статті – виклад результатів моделювання довгострокових змін водного стоку на річках Українських Карпат як перспективного джерела гідроенергетичного потенціалу. У дослідженні вперше представлено технологічну схему використання водно-балансової моделі Турка для регіональної оцінки впливу клімату на водні ресурси, яка включає такі етапи: 1) підготовка гідрологічної та кліматичної інформації для досліджуваного об'єкта за історичний період спостережень; 2) вибір кліматичних проєкцій, які характеризують зміну клімату досліджуваної території на довгострокову перспективу; 3) вибір референтного періоду для калібрування гідрологічної моделі та виконання процедури калібрування; 4) валідація моделі з використанням даних за історичний період спостережень (ретропрогноз); 5) моделювання (симуляція) водного стоку на довгострокову перспективу; 6) корекція результатів моделювання за методом «Change Factor (CF)» згідно відповідних рекомендацій; 7) оцінка якості моделювання з використанням методу «bias correction». Розроблену схему апробовано на річках Карпатського регіону. Результати апробації порівняно з результатами, отриманими за допомогою чисельної моделі SWIM. Зроблено висновок, що при дотриманні методологічних рекомендацій, викладених у технологічній схемі розрахунків, використання водно-балансової моделі демонструє цілком задовільні результати.

Ключові слова: водні ресурси; річковий стік; зміна клімату; валідація; калібрування; корекція.

**S.I. Snizhko¹, O.G. Obodovskyi¹, O.G. Shevchenko¹, V.V. Grebin¹, Iu.S. Didovets², I.V. Kuprikov¹,
O.O. Pochaievets¹**¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine²Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany

REGIONAL ASSESSMENT CHANGES OF THE RIVERS RUNOFF OF UKRAINIAN CARPATHIANS REGION UNDER CLIMATE CHANGES

The purpose of this article is to model long-term changes in water runoff in the Ukrainian Carpathians rivers as a perspective source of hydropower potential. The study presents for the first time a process scheme of the use of the Turc water-balance model for regional assessment of climate impacts on water resources which includes the following steps: 1) preparation of hydrological and climatic information for the studied object during the historical period of observation; 2) selection of climate projections that characterize the climate change of the study area for the long term; 3) selecting a reference period for calibrating the hydrological model and performing the calibration procedure; 4) validation of the model using historical observation data (retrospective); 5) modeling (simulation) of water runoff for the long term; 6) correction of results of modeling by the method «Change Factor (CF)» according to recommendations; 7) evaluation of simulation quality using the bias correction method. The scheme developed was tested on the rivers of the Carpathian region. The results of the approbation are compared with those obtained using the numerical model SWIM. It is concluded that, subject to the methodological recommendations outlined in the technological scheme of calculations, the use of the water-balance model shows quite satisfactory results.

Keywords: water resources; river runoff; climate change; validation; calibration; correction.

Актуальність теми дослідження

Залежність України від поставок енергоносіїв з території Росії, тимчасова втрата Донецького вугільного басейну як одного з основних джерел постачання енергетичного вугілля для електростанцій внаслідок російської військової агресії у 2014 р. змушують Україну до пошуків механізмів диверсифікації поставок енергоресурсів, а також до розробки власних відновлюваних джерел енергії. В Україні існують значні потенційні можливості для розвитку малої екологічно безпечної гідроенергетики. Виходячи з показників забезпеченості водними ресурсами, найперспективнішим регіоном для розвитку гідроенергетики за рахунок малих ГЕС є Українські Карпати, де середній рівень забезпеченості водним стоком становить 151,8 – 618,7 тис.м³ з 1 км² на рік [1], що в 2-7 разів перевищує аналогічні показники для рівнинної частини України.

Однак, у багаторічному аспекті гідроенергетична галузь залежить від глобальних процесів зміни клімату, від глобального потепління, дія якого має часом однонаправлений тривалий характер і може призвести як до тривалого в часі зниження водного стоку річок, так і до його збільшення. Тому для розвитку малої гідроенергетики на річках Українських Карпат в екологічно допустимих межах (без завдання шкоди їх екосистемам) [2] необхідно мати науково обґрунтовані дані на довгострокову перспективу про наявність та доступність водних ресурсів як джерела гідроенергетичного потенціалу. Екологічно науково необґрунтоване енергетичне використання їх водних ресурсів може призвести до незворотних змін їхніх екосистем. Тому ми виділяємо екологічно допустимий гідроенергетичний потенціал річок.

Стан вивчення питання, основні праці

Перші оцінки щодо майбутніх змін водних ресурсів України отримані А.І. Шерешевським з використанням розрахунків за моделями загальної циркуляції атмосфери GFDL, UKMO, MPI засвідчили, що стік річок верхньої частини басейну Дніпра в середині XXI ст. знизиться на 2-18%, а стік решти річок басейну збільшиться на 20-30%. Оцінка можливих змін водних ресурсів України в умовах глобального потепління клімату, виконана авторами на кафедрі метеорології і кліматології Київського національного університету імені Тараса Шевченка з використанням водно-балансової моделі Турка, показала, що протягом XXI ст. в Україні (за винятком річкових басейнів

в межах Українських Карпат і Закарпаття) буде спостерігатися зменшення водного стоку на 25-50% [3]. Аналогічні результати отримані вченими Одеського державного екологічного університету з використанням водно-балансової моделі і кліматичних сценаріїв RCP4.5 and RCP8.5, показали, що до середини поточного століття відбудеться значне зменшення водних ресурсів рівнинної території України (до 70% на південному сході), а в зоні Українських Карпат спостерігатиметься стабілізація і навіть збільшення водних ресурсів.

Розрахунки Ю. В. Божок [4] за сценарієм A2 показали, що у період з 2031 до 2050 рр. стік маловодних років (75% забезпеченості) та дуже маловодних років (95% забезпеченості) зменшиться на півдні України відповідно на 60-70% та на 10%.

Разом з тим, розрахунки Л.О Горбачової [5] за сценарієм A1B показують, що очікувані зміни середньорічного стоку відносно базового періоду 1991-2010 рр. знаходитимуться в межах природних коливань водності $\pm 15\%$ від багаторічної норми стоку.

В останніх дослідженнях використано еколого-гідрологічну модель SWIM [6] і регіональні кліматичні сценарії з європейського міждисциплінарного проекту IMPRESSIONS і 7 кліматичних проєкцій з RCP 4.5 і RCP 8.5, в яких було оцінено можливі зміни водних ресурсів у різних регіонах України на прикладі трьох басейнів-індикаторів – р.Тетерів, р.Самара і р.Західний Буг [7]. У басейні Тетерева очікується збільшення стоку в зимові місяці та на початку весни, досягаючи максимуму в березні-квітні. У літні місяці в найближчому майбутньому (до 2040 р.) не очікується змін стоку, проте в середньому (2041-2070 рр.) і віддаленому прогностичному періодах (2071-2100 рр.) очікується незначне зниження стоку (до 17%). Існує велика ймовірність припинення стоку в період літньої межени та збільшення в осінні місяці для всіх прогностичних періодів. У басейні Західного Бугу очікується збільшення стоку порівняно з контрольним періодом протягом усіх сезонів з невеликим спорадичним зменшенням у весняні місяці в найближчому і віддаленому майбутньому за всіма сценаріями.

Результати, отримані для басейну річки Самара за «high-end» сценаріями показують збільшення стоку практично в усі місяці, крім квітня. Однак слід зауважити, що отримані оцінки зміни водного стоку для цього басейну характеризуються найбільшою невизначеністю, причина якої пов'язана з дуже зміненим гідрологічним режимом річки.

Отже слід зазначити, що оцінок майбутніх змін водних ресурсів в Україні є достатньо, проте вони отримані з використанням різних методів, різних кліматичних сценаріїв та гідрологічних моделей і часто суперечать одна одній. У таких оцінках часто не вистачає регіонального підходу.

Мета цього дослідження – виклад результатів моделювання довгострокових змін водного стоку на річках Українських Карпат як перспективного джерела гідроенергетичного потенціалу.

Методика досліджень

Для забезпечення розрахунків гідроенергетичного потенціалу річок на віддалену перспективу (до 2050 р.) достатньо виконати розрахунки характеристик середнього річного водного стоку з урахуванням можливих змін клімату, отриманих з існуючих кліматичних проєкцій для даної території. Вважається, що для таких оцінок, коли не потрібне детальне дослідження процесів, можна застосувати спрощені методи кількісної оцінки, наприклад, метод водного, або водно-теплого балансу.

Українські гідрологи мають досвід застосування цього методу для вирішення аналогічних завдань, зокрема в роботі Є.Д. Гопченко та Н.С. Лободи [8] було реалізовано рівняння водно-теплого балансу для вирішення задачі оцінювання природних водних ресурсів України. Використовуючи цей метод, автори також виконали оцінку можливих змін водних ресурсів України в умовах глобального потепління.

Враховуючи зростаючу доступність результатів моделювання клімату майбутнього за моделями МЗЦАО, в тому числі і для території України, варто звернути увагу на використання водно-балансових методів розрахунку, які використовують результати цього моделювання.

Польський гідролог З. Качмарек виконав у 1990-х роках серію досліджень, щоб оцінити чутливість водного стоку річкового басейну до змін кліматичних характеристик, а разом з Д. Красуським [9] порівняли дві водно-балансові моделі (М. Будико та Л. Турка) і встановили, що точність формули Л. Турка при оцінюванні річного стоку є значно краще адаптованою до використання даних глобальних моделей циркуляції атмосфери. Вдосконалена З. Качмарек водно-балансова модель Л. Турка дозволила отримати цілком задовільні результати прогнозу для басейнів річок Європи, пройшла апробацію стосовно річкових

басейнів різних природних зон у рамках програми досліджень U.S. Country Studies Program [10, 11], які оцінюють зміни водних ресурсів в понад 40 країнах світу.

Модель Л. Турка, що описує співвідношення між стоком, опадами і температурою представлена формулами 1 – 3.

$$Q_a = P_a \left[1 - \frac{L_a}{\sqrt{cL_a^2 + P_a^2}} \right] \quad (1)$$

$$L_a = 300 + 25T_a + 0,05T_a^3 \quad (2)$$

$$P_a > (1 - c)^{0,5} L_a, \quad (3)$$

де Q_a – середній річний стік, мм;

P_a – середня річна сума опадів, мм;

L_a – коефіцієнт регресії для залежності стоку від температури;

T_a – середня річна температура, °C;

c – калібраційний коефіцієнт, який визначається для даного річкового басейну на основі наявних даних про стік, опади та температуру.

Вибір калібраційного коефіцієнта для кожного річкового басейну є основою процедури параметризації моделі. Його розраховують за формулою 4:

$$c = \frac{\left(\frac{L_a}{1 - \frac{Q_a}{P_a}} \right)^2 - P_a^2}{L_a^2} \quad (4)$$

де позначення аргументів ті ж самі, що й у формулах (1-3).

Виходячи з вище зазначеного, можна рекомендувати цю модель як основну для прогнозування змін водного стоку річок Українських Карпат із застосуванням додаткової процедури коригування модельних даних за методом «Change Factor (CF)» згідно рекомендацій [12].

Цю процедуру здійснено на основі рівняння (5), з використанням відмінностей між даними за історичний період спостережень та модельованими даними за референтний період. Передумовою використання методу є передбачення збереження варіації досліджуваної величини у майбутньому, що у нашому випадку – дослідження зміни норми стоку, дійсно справджується:

$$\bar{Q}_{corr} = \bar{Q}_{obs ref} + \frac{\delta_{obs ref}}{\delta_{mod ref}} (\bar{Q}_{obs ref(t)} - \bar{Q}_{mod ref}), \quad (5)$$

де \bar{Q}_{corr} – скоригований річний водний стік; $\bar{Q}_{obs ref}$ – норма стоку за референтний період; $\bar{Q}_{obs ref(t)}$ – значення річного стоку води за конкретний рік (t) періоду спостережень; $\bar{Q}_{mod ref}$ – норма стоку за історичний період,

обчислений як Q_a за рівнянням (1); $\delta_{obs ref}$ - стандартне відхилення річного стоку води за історичний період; $\delta_{mod ref}$ - стандартне відхилення річного стоку води в майбутньому періоді.

Узагальнивши методологічні підходи, які проаналізовано вище, автори розробили технологічну схему регіональної оцінки та симуляції водного стоку [13], яку й використали для виконання досліджень.

Методика підготовки кліматичних даних для прогнозування водного стоку

Для прогнозування водного стоку річок як вхідні параметри водно-балансової моделі використано кліматичні проєкції з європейського проєкту "IMPRESSIONS – Impacts and Risks from High-End Scenarios: Strategies for Innovative Solutions", які побудовані за чотирма репрезентативними сценаріями викидів парникових газів (RCP) в атмосферу: RCP2.6, RCP4.5, RCP6, та RCP8.5 [14] на період до 2070 р. та уточнені для території України у Датському метеорологічному інституті та Потсдамському інституті кліматичних досліджень. Кожен з цих сценаріїв враховує широкий спектр наукових та соціально-економічних даних, таких як зростання ВВП, населення, землекористування, змін в енергетичному секторі, зростання емісії парникових газів.

Для симуляції водного стоку річок України на найближчу (до 2040 р.) та середню (до 2070 р.) перспективу було використано середній сценарій зміни клімату в Україні, який базується на двох репрезентативних траєкторіях концентрацій парникових газів RCP4.5 і RCP8.5 та ансамблю двох глобальних (HadGEM2 і GFDL-ESM2M) та регіональної моделі (ES/RCA4).

У розрахунках використано інформацію з усіх

вузлів прямокутної координатної сітки з кроком $0,5^\circ$ по широті і довготі, якою умовно була покрита територія водозборів річок басейнів Тиси, Пруту, Дністра (всього 19 вузлів) та з 25 метеорологічних станцій (МС).

Характеристика загальних трендів кліматичних змін на досліджуваній території

Аналіз очікуваних кліматичних змін на території України за RCP-сценаріями [15] показує, що за усіма сценаріями до кінця поточного століття температура повітря зростає від 3 до 8 $^\circ\text{C}$. Наші розрахунки показують, що у 2010-2040 рр. середня річна температура повітря у межах територій досліджуваних басейнів зростає на 1,1-1,2 $^\circ\text{C}$ (15-18%), а у 2041-2070 рр. – на 1,8-2,3 $^\circ\text{C}$ (25-34%) порівняно з базовим референсним періодом 1980-2010 рр. (рис. 1А).

Стосовно режиму зволоженості території, то істотні його зміни не передбачаються. У 2010-2040 рр. річна сума опадів у межах досліджуваних річкових басейнів практично не зміниться; відхилення від норми референсного періоду становитимуть $\pm 1\%$. У 2041-2070 рр. теж значних змін не передбачається: невелике зменшення опадів від 3 мм (басейн Дністра) до 26 мм (басейн Пруту) порівняно з періодом 1980-2010 рр. (рис. 1Б)

Отже, згідно з результатами моделювання клімату, у формуванні водного балансу досліджуваних водних об'єктів провідну роль матиме зростаюча температура повітря при незмінній кількості опадів. Однак слід мати на увазі, що для сучасного клімату характерний нерівномірний розподіл опадів впродовж гідрологічного року. Дуже сильні зливові опади, особливо у літній період року (30 мм і більше протягом 12 і більше

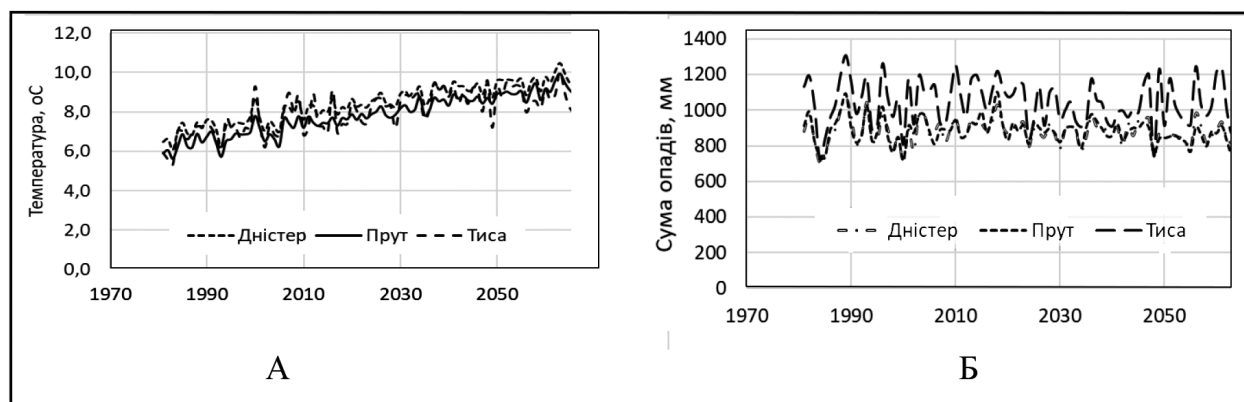


Рис. 1. Проєкції середньої річної температури (А) та суми опадів (Б) для територій річкових басейнів Дністра, Прута, Тиси до 2070 року

годин), які вже стали типовими для України [16], можуть призводити до формування катастрофічних паводків на досліджуваних річках. Згідно наших досліджень [17], до кінця поточного століття кількість паводків на р.Тиса збільшиться від 4,4 до 62%, а на р. Прут від 11 до 22%.

Калібрування водно-балансової моделі та її валідація

Калібрування моделі Л. Турка виконано шляхом розрахунку спеціально передбаченого розробниками калібрувального коефіцієнта C за рівнянням (4) на основі наявних фактичних даних про стік, опади та температуру за певний період часу, який називається калібрувальним (референтним) періодом. Рівняння (4) програмується в середовищі Excell і використовується для розрахунку найоптимальнішого калібраційного коефіцієнта C , при якому розрахунок Q_a (в подальшому - Q_{mod}) за рівнянням (1) дає найменшу відносну похибку між фактичними (Q_{obs}) та розрахованими (Q_{od}) значеннями водного стоку.

У цій роботі за референтний калібрувальний період за аналогією з європейським проектом "IMPRESSIONS" обрано період з 1981 по 2010 рр., оскільки саме з цього проекту використано кліматичні проєкції на XXI ст., уточнені для території України [14].

Для калібрування моделі було використано метеорологічні (середні річні значення температури та суми опадів) та гідрологічні спостереження (середні річні витрати води) для референтного періоду (1981-2010 рр.)

Процедурі прогнозування передують процедура валідації емпіричної водно-балансової моделі, тобто перевірка її здатності прогнозувати в межах необхідної точності. Валідація включає запуск моделі з використанням даних фактичних спостережень ретроспективного періоду, які не використовувалися під час процесу калібрування, та параметрів, які були визначені (відкориговані) в процесі калібрування для референтного періоду. Власне виконується своєрідний ретроспективний прогноз для перевірки збіжності фактичних та розрахованих за моделлю даних.

Виклад основного матеріалу з обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Для дослідження впливу зміни клімату на водний стік виконано комплекс калібраційно-валідаційних розрахунків згідно методичних рекомендацій, що наведені вище.

Приклад отриманих результатів калібрування параметрів моделі для розрахунку середнього річного водного стоку за даними референтного кліматичного періоду (1981-2010 рр.) для 4 репрезентативних басейнів Тиса (Вилок), Стрий (Верхнє Синьовидне), Свіча (Зарічне), Прут (Чернівці) наведено на **рис. 2** у вигляді сумішених графіків часового ходу фактичних витрат води (Q_{obs}) і змодельованих (Q_{mod}) за водно-балансовою моделлю Турка.

Виконання процедури коригування модельних результатів згідно рекомендацій [12] на основі рівняння (5) забезпечило можливість значно покращити точність прогнозу середнього річного водного стоку. На **рис. 3** показано ефект від *bias* корекції шляхом порівняння змодельованого (Q_{mod}) та скоригованого водного стоку (Q_{corr}) зі спостереженням (Q_{obs}) на прикладі розрахунків стоку для р. Прут.

Ефективність фітінгу моделі шляхом корекції змодельованих даних в межах референтного періоду методом «change factor» можна підтвердити порівнянням міри наближення змодельованих даних до спостережених (R^2), яка для р.Стрий збільшилася від 0,46 (до корекції) до 0,95 після корекції (**рис.4**). Зазвичай результати моделювання вважаються достатньо точними, якщо значення $R^2 \geq 0,5$ [18].

Чисельні характеристики результатів корекції результатів валідації гідрологічної моделі показано у **таблиці 1**. У ній порівнюються норми водного стоку річок за весь історичний період інструментальних спостережень (\bar{Q}_{obs}) із змодельованими (\bar{Q}_{mod}) в процесі валідації моделі (процедура ретропрогнозу) та із скоригованими (\bar{Q}_{corr}). Для оцінки успішності калібрування та валідації моделі було застосовано критерій PBIAS [19].

Якщо після валідації водно-балансової моделі середня величина PBIAS для моделі Турка склала для даної групи річок 2,6-14,9%, то після коригування результатів за методом «change factor» величина середніх значень PBIAS для тих самих випадків склала 1,04-4,86%. Д. Моріарсі та ін. [20] вважає, що значення PBIAS в діапазоні $\pm 15\%$ свідчить про хороший вибір моделі. Якщо до корекції моделі максимальна величина PBIAS в окремі роки для даної групи річок коливалась від 40,4 до 53,8%, то в процесі корекції вона зменшилась до 5,1-23,9%. Значна різниця між спостереженими і змодельованими значеннями можуть бути пояснені недостатньою доступністю метео-

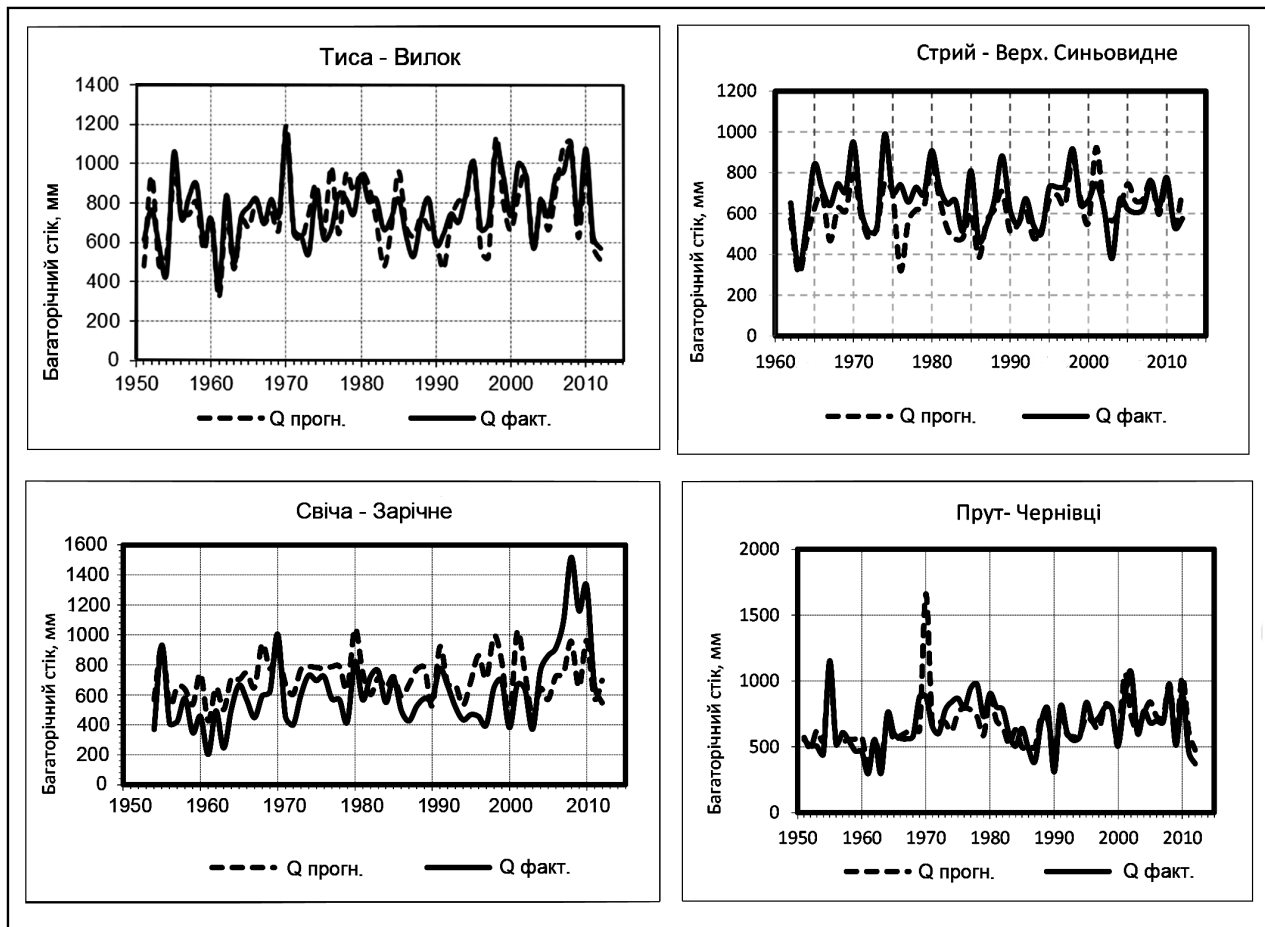


Рис. 2. Результати порівняння фактичних витрат води (Q_{obs}) і змодельованих (Q_{mod}) за водно-балансовою моделлю Турка

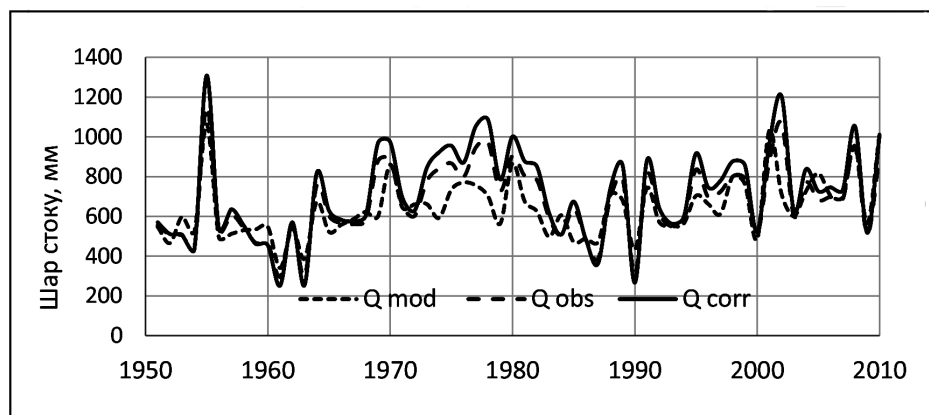


Рис.3. Порівняння змодельованого (Q_{mod}) та скоригованого водного стоку (Q_{corr}) зі спостереженням (Q_{obs}) для референсного періоду на прикладі розрахунків стоку р. Прут у створі м.Чернівці

рологічних та гідрологічних даних в гірських регіонах [21].

Для узагальнення результатів валідації гідрологічної моделі складено таблицю 2, у якій представлено порівняння водного стоку за базо-

вий період спостережень, розрахованих за даними гідрологічних спостережень ($Q_{факт}$) зі змодельованими ($Q_{прогн}$); наведені також значення абсолютної та відносної похибок розрахунків.

Для відповіді на питання про коректність

Таблиця 1.

Порівняння результатів валідації моделі Турка та корекції отриманих модельних результатів методом «change factor»

Річковий басейн	\bar{Q}_{obs} , мм	\bar{Q}_{mod} , мм	\bar{Q}_{corr} , мм	PBIAS, %	
				Після валідації	Після коригування
				Середнє Мін-макс	Середнє Мін-макс
Тиса	726,6	725,6	723,7	14,9 1,7-52,6	2,55 0,11-5,1
Свіча	563,3	560,7	622,1	2,76 0,19-53,8	1,04 0,08-23,9
Стрий	666,3	655,7	662,5	11,2 0,03-60,6	2,91 0,001-12,9
Прут	674,8	639,8	718,1	2,60 0,22-40,4	4,86 0,29-15,3

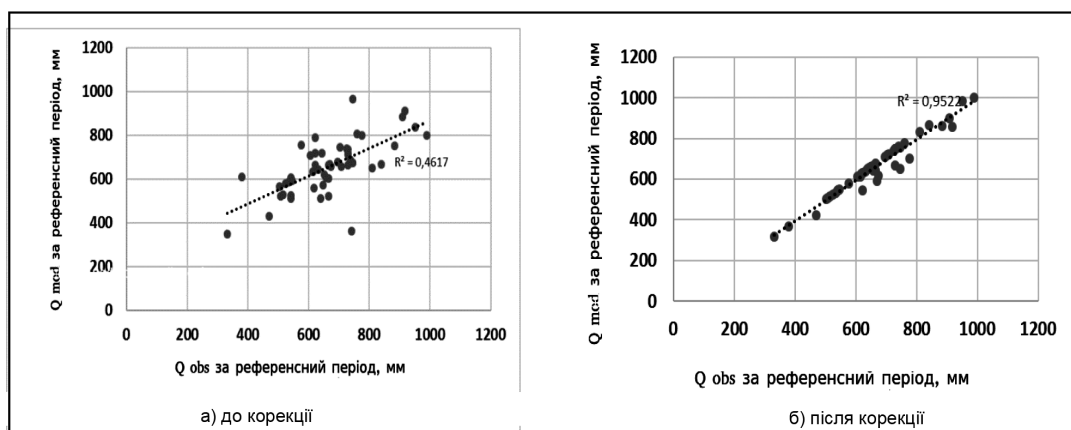


Рис.4. Приклад ефективності фітінгу моделі Турка шляхом корекції змодельованих даних в межах референтного періоду методом «change factor» для р. Стрий

результатів моделювання водного стоку на період до 2070 р. було виконано порівняння отриманих результатів для гідрологічної станції р.Тиса – смт Вилки за моделлю Турка з результатом середнього ансамблевого прогнозу для цієї ж станції на аналогічний період з використанням чисельної еколого-гідрологічної моделі SWIM та 7 кліматичних сценаріїв з європейського проекту «IMPRESSIONS» [14].

На рис.5 показано, як результати скоригованих модельних розрахунків середнього річного стоку р.Тиса в створі смт Вилки за моделлю Турка збігаються із середньою ансамблевою симуляцією стоку за 7 сценаріями з використанням моделі SWIM а в таблиці 3 – оцінки цього порівняння.

Наведені в таблиці 3 розрахунки показують, що модель Турка дає достатньо точні результати розрахунків і цілком може бути використана для регіональних досліджень водного стоку річок.

Прогноз водного стоку основних річок регіону для різних часових періодів

Розрахунок здійснено за формулою (1) після калібрування моделі за формулою (4) та виконання процедури її валідації з використанням повних історичних рядів даних спостережень (ретропрогноз) з наступною корекцією змодельованих результатів за методом «change factor» згідно формули (5) для басейнів річок Тиси, Пруту і Дністра.

Після проведення процедури калібрування та валідації моделі на ретроспективних історичних рядах спостережень було виконано довгострокове прогнозування водного стоку в межах досліджуваних річкових суббасейнів на найближчу (2011–2040 рр.) та середню (2041 – 2070 рр.) перспективи з використанням водно-балансової моделі Турка. Як вхідні кліматичні параметри моделі в цьому випадку було використано осереднені значення температури та атмосферних опадів для

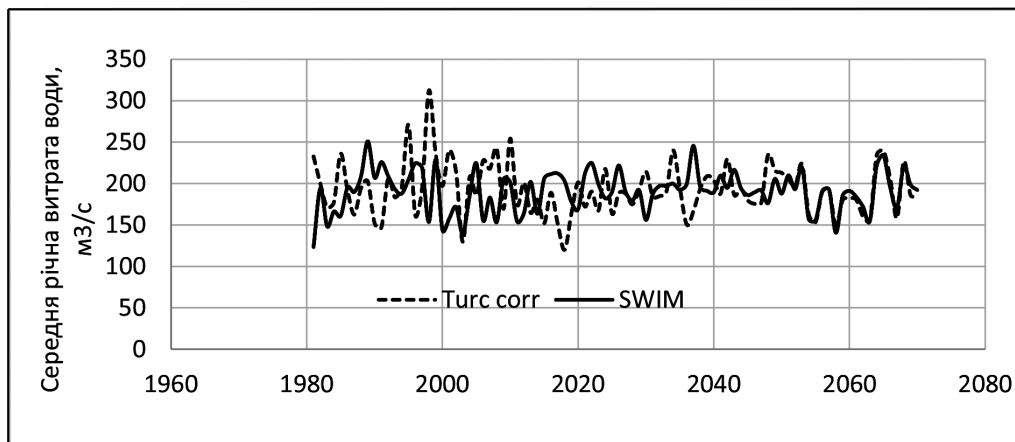


Рис. 5. Порівняння змодельованого за допомогою моделі Турка водного стоку р. Тиси (пост Вилок) із середньою ансамблевою симуляцією стоку за моделлю SWIM

вузлів розрахункової сітки в межах виділених районів річкових басейнів і суббасейнів згідно проекту IMPRESSIONS.

Кліматичні показники для прогнозу водного стоку розраховано згідно кліматичного прогнозу за траєкторіями RCP4.5 та RCP8.5 з використанням комбінації (ансамблю) моделей GFDL-ESM2M/HadGEM2-ES/RCA4, що нині дає найбільш достовірну вихідну інформацію, оскільки систематичні помилки, властиві кожній окремій моделі, часто виявляються випадковими по відношенню до ансамблю моделей і при усередненні взаємно компенсуються.

Результати прогнозу водного стоку для досліджуваних річок на найближчу (2011–2040 рр.) та середню (2041–2070 рр.) перспективи наведено в таблиці 4.

Результати виконаних розрахунків для періоду найближчої перспективи (до 2040 р.) свідчать про стабільність водного стоку річок басейнів Тиси і Пруту (норма стоку зростає неістотно на 1,1-1,2 %) та про невелике зменшення стоку у басейні Дністра (на 6,7%) порівняно з референсним періодом. Стосовно другого розрахункового періоду (2041-2070 рр.) отримано такі результати: стік річок басейну Дністра продовжуватиме знижуватися і до кінця періоду зменшиться майже на 50 мм (13,8%) порівняно з референсним періодом 1980-2010 рр; у басейнах Тиси і Пруту теж буде спостерігатися незначне зниження стоку – на 3,7 і 4,4% відповідно до норми стоку референсного періоду. Візуалізація результатів відносної оцінки змін водного стоку річок Українських Карпат представлена на рис. 6.

Таблиця 2.

Результати валідації водно-балансової моделі Турка (ретропрогноз середнього річного водного стоку в межах виділених районів річкових басейнів і суббасейнів за багаторічний період

Назва басейну (суббасейну) річки	Q факт, мм	Q прогн, мм	ΔQ , мм	ΔQ , %
Басейн річки Дністер	139,9	139,3	0,6	0,4
Суббасейн річки Тиса	604,7	598,9	5,8	1,0
Суббасейн річки Прут	311	303,4	7,6	2,4

Таблиця 3.

Порівняння розрахункових величин середніх річних витрат води ($\text{м}^3/\text{с}$) за різні періоди, отриманих за моделлю SWIM та скоригованого прогнозу за моделлю Турка

Період	SWIM	Модел ь Турка	Qobs	Різниця в оцінці, %
1981–2010	187,1	203,7	203,7	7,8
2011–2040	190,0	182,3	–	4,0
2041–2070	201,1	193,4	–	3,8

Висновки

В результаті проведених досліджень оцінено вплив зміни клімату на водний стік річок Українських Карпат на період до 2070 р. Порівняння проєктованого водного стоку дослідженої групи річок на найближчу (до 2040 р.) та середню (до 2070 р.) перспективи з нормою стоку референсного періоду показало, що до 2070 р. в цьому

Таблиця 4.

Очікувані зміни середнього річного водного стоку (ΔQ) у межах басейнів і суббасейнів річок Карпатського регіону у 2011 – 2040 рр. та 2041 – 2070 рр. у порівнянні з референсним періодом 1981 – 2010 рр.

Назва басейну (суббасейну) річки	Q obs 1981-2010 рр, мм	Q mod 2011-2040 рр, мм	ΔQ 2011-2040 рр., %	Q mod 2041-2070 рр, мм	ΔQ 2041-2070 рр., %
Басейн річки Дністер	354,6	330,9	-6,7	305,7	-13,8
Суббасейн річки Тиса	604,7	611,2	1,1	582,3	-3,7
Суббасейн річки Прут	311	314,8	1,2	297,3	-4,4

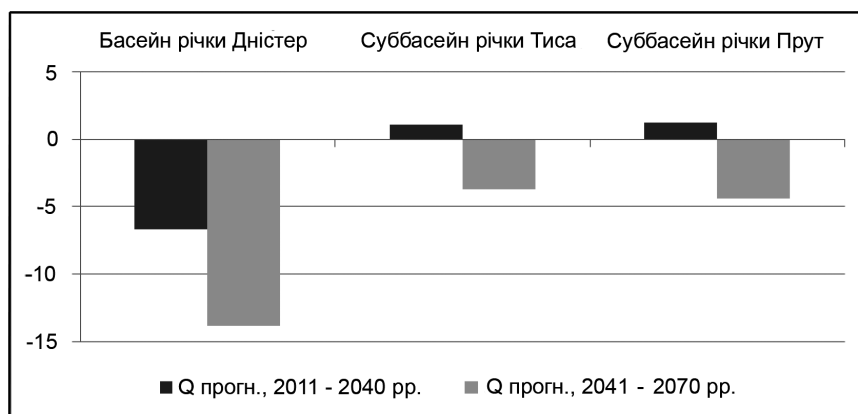


Рис.6. Очікувані відносні зміни (%) середнього річного стоку води у басейнах Тиси, Пруту, Дністра для двох 30-річних періодів 2011-2040 рр. та 2041-2070 рр. порівняно з референсним періодом 1981 - 2010 рр.

регіоні не відбудеться різких змін водного стоку, які могли б стати перешкодою для розвитку малої гідроенергетики та інших видів господарської діяльності. Найбільше зменшення водного стоку очікується у басейні Дністра: у 2011-2040 рр. на 6,7%, а у 2041-2070 рр. – на 13,8%, тобто майже на 50 мм порівняно з референсним періодом (1980-2010 рр.). Водний стік річок басейнів Тиси і Пруту у 2011-2040 рр. зросте неістотно – на 1,1-1,2 %, а у 2041-2070 рр. – дещо знизиться – на 3,7 і 4,4% відповідно до норми стоку референсного періоду.

Отримані оцінки зміни водного стоку гірських річок на основі проведених симуляційних процедур свідчать, що вони не є істотними для порушення гідрологічного режиму та водогосподарського балансу регіону. Отже, можна зробити висновок, що водний стік річок Карпатського ре-

гіону щонайменше до 2070 р. буде змінюватися лише у межах природних флуктуацій.

Отримані результати характеризуються достатньою точністю, що базується на якості вихідних гідрологічних та метеорологічних даних, результатах кліматичного прогнозу та методики водно-балансового моделювання і можуть бути використані як для розрахунку екологічно допустимого гідроенергетичного потенціалу Карпатських річок, так і для розроблення заходів щодо адаптації водного господарства регіону до очікуваних кліматичних змін. Не зважаючи на задовільну точність виконаних розрахунків, автори не відкидають необхідності застосування точніших чисельних методів довгострокового прогнозування водного стоку досліджуваних річок у близькому майбутньому.

References [Література]

1. Yatsyk A.V., Gryshchenko Yu.M., Volkova L.A., Pasheniuk I.A. (2007). *Water resources: the use, protection, restoration, management: The textbook for university students*. Kyiv, 360 p. [In Ukrainian].
[Водні ресурси: Використання, охорона, відтворення, управління: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / А.В.Яцик, Ю.М.Грищенко, Л.А.Волкова, І.А.Пашенюк. Київ.: Генеза, 2007. 360 с.]

2. Pop S.S., Sharodi I.S., Sharodi Yu.V., Ganzel A.V. (2015). Transcarpathian region hydropower: status and prospects of development. *Ukrainian geographical Journal*, 2, 65-71. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2015.092.065> [In Ukrainian]. [Поп С.С., Шароді І.С., Шароді Ю.В., Ганзел А.В. Гідроенергетика Закарпаття: стан та перспективи розвитку // Укр. геогр. журн. 2015. № 2. С.65-71. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2015.092.065>]
3. Snizhko S., Yatsyuk M., Kuprikov I., Strutinskaya V., Shevchenko O., Krakowska S., Palamarchuk L., Shedemenko I. (2012). Estimation of Possible Changes in Local Water Resources in Ukraine in the 21st Century. *Water management of Ukraine*, 6 (102), 8-16. [In Ukrainian]. [Оцінка можливих змін водних ресурсів місцевого стоку в Україні в XXI столітті / С. Сніжко, М. Яцюк, І. Купріков, В. Струтинська, О. Шевченко С. Краковська, Л. Паламарчук, І. Шедеменко // Водне господарство України. 2012. № 6 (102). С. 8-16.]
4. Bozhok Yu. V. (2015). *Annual and lowflow runoff of rivers in the northwestern Black Sea in the face of climate change*. Thesis for the degree of doctor of geogr. Odessa, 300 p. [In Ukrainian]. [Божок Ю. В. Річний та меженний стік річок північно-західного Причорномор'я в умовах змін клімату. Дис. на здобуття наук. ступеня к. геогр. н. Одеса, 2015. 300 с.]
5. Gorbachova L.O. (2017). *Hydrologic-genetic analysis of spatio-temporal patterns of water runoff of Ukraine's rivers: methodology, trends, forecast*. Thesis for the degree of doctor of geogr. Kyiv. 400 p. [In Ukrainian]. [Горбачова Л.О. Гідролого-генетичний аналіз просторово-часових закономірностей водного стоку річок України: методологія, тенденції, прогноз. Дис. на здобуття наук. ступеня д. геогр. н. Київ. 2017. 400 с.]
6. Krysanova, V., Wechsung, F., Arnold, J., Ragavan, S., Williams, J. (2000). *SWIM (Soil and Water Integrated Model), User Manual*. PIK Report Nr. 69: Potsdam, Germany, 2000.
7. Didovets I., Lobanova N., Bronstert A., Snizhko S., FoxMaule K. Krysanova V. (2017). *Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Three Representative Ukrainian Catchments Using Eco-Hydrological Modelling*. *Water*. 18 p. doi:10.3390/w9030204
8. Gopchenko E.D., Loboda N.S. (2001) Estimation of water resources of Ukraine by the method of water-heat balance. *Scien. Proceedings of the UkrNDHMI*. Iss. 249, 106–119. [In Ukrainian]. [Гопченко Є.Д., Лобода Н.С. Оцінювання водних ресурсів України за методом водно-теплогового балансу // Наук. Праці УкрНДГМІ. 2001. Вип. 249. С. 106–119]
9. Kaczmarek Z., Krasuski D. (1991). Sensitivity of Water Balance to Climate Change and Variability. *IIASA Working Paper WP-91-047*. IIASA, Laxenburg, Austria, 25 p.
10. Turc L. (1954). Water Balance of Soils: Relationship Between Precipitation, Evapotranspiration and Runoff. *Annales Agronomiques*. Vol. 5, 491-595 and Vol. 6, 5-131. [In French].
11. Strzepek K. M., Yates D.N. (1997). Climate Change Impact on the Hydrological Resources of Europe: A Simplified Continental Scale Analysis. *Climatic Change*, 36, 79–92.
12. Tabor K., Williams J. W. (2010). Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. *Ecological Applications*, 20 (2), 554–565.
13. Snizhko S., Shevchenko O., Didovets I., Obodovskiy O., Pochaievets O. (2019). *Cimate monitoring data application in the technological regional assessment scheme and simulation of water flow*. 5 p. DOI: 10.3997./2214-4609.201903241.
14. IMPRESSIONS – Impacts and Risks from High-End Scenarios: Strategies for Innovative Solutions URL: <http://www.impressions-project.eu>.
15. Snizhko S., Shevchenko O., Didovets I., Ganchuk A., Demchuk-Marygina D. (2019). Temperature projections in Ukraine in the 21st century with RCP-scenarios. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 3 (54), 157-158. [In Ukrainian]. [Сніжко С.І., Шевченко О.Г., Дідовець Ю.С., Ганчук А.В., Демчук-Маригіна Д.П. Проекції температури повітря в Україні на XXI століття на основі RCP-сценаріїв // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2019. № 3 (54). С.157-158.]
16. Osadchij V., Babichenko V. (2012). Dynamics of natural meteorological phenomena in Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*, 4, 8-14. [In Ukrainian]. [Осадчий В.І., Бабіченко В.М. Динаміка стихійних метеорологічних явищ в Україні // Укр. геогр. журн. 2012. №4. С.8-14.]
17. Didovets I., Krysanova V., Bürger G., Snizhko S., Balabukh V., Bronstert A. (2019). Climate change impact on regional floods in the Carpathian region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22, 14. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.01.002
18. Santhi C., Arnold J. G., Williams J. R., Dugas W. A., Srinivasan R., Hauc L. M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc*, 37(5). 1169-1188.
19. Gupta H. V., Sorooshia S., Yap P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng*. 4(2), 135-143.
20. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Binger R.L., Harmel R.D., Veith T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 2007, 50, 885–900.
21. Weedon G., Balsamo G., Bellouin N., Sandra Gomes S., Martin J., Best M., Viterbo P. (2014). *The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data* *Water Resources Research*. DOI:10.1002/2014WR015638

Стаття надійшла до редакції 16.02.2020