

Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Географічний факультет  
Кафедра метеорології та кліматології

На умовах рукопису

УДК. 551.58+556.5

Оцінка впливу зміни клімату на водний стік річок України

Галузь знань 10 - Природничі науки

Спеціальність 103 - Науки про Землю

Освітня програма Метеорологія

Кваліфікаційна робота магістра  
студента 2 курсу  
освітнього рівня магістр  
Магдюка Владислава Леонідовича

Науковий керівник:  
д. геогр. наук, проф.  
Сніжко Сергій Іванович

Допустити до захисту:

Завідувач кафедри метеорології та кліматології, проф.Сергій СНИЖКО

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Київ - 2025

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗМІНИ КЛІМАТУ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ГІДРОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ.....	5
1.1. Огляд виконаних досліджень за темою магістерської роботи.....	5
1.2. Оцінка ролі кліматичного чинника у формуванні водного стоку річок України.....	10
РОЗДІЛ 2. ВИВЧЕННЯ МЕТОДОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КЛІМАТУ НА ВОДНІ РЕСУРСИ.....	16
2.1. Гідрологічне моделювання.....	17
2.2. Використання кліматичних даних та підбір кліматичних проекцій.....	21
2.3. Вибір річкових басейнів, підготовка гідрологічних даних, калібрування гідрологічної моделі.....	25
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОГО СТОКУ РІЧОК УКРАЇНИ ДЛЯ ПЕРІОДУ НАЙБЛИЖЧОЇ ТА ВІДДАЛЕНОЇ ПЕРСПЕКТИВИ.....	28
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА МОЖЛИВОГО ВПЛИВУ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА ВОДНИЙ СТІК РІЧОК УКРАЇНИ.....	38
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	49

## ВСТУП

У XXI столітті проблема зміни клімату набула глобального характеру та стала однією з найактуальніших тем наукових досліджень. Підвищення середньорічної температури, зміна кількості та просторового розподілу опадів, зростання частоти екстремальних погодніх явищ призводять до трансформації природних процесів, зокрема гідрологічних. Для України, яка має розгалужену річкову мережу, ці зміни мають істотне значення, оскільки водні ресурси відіграють ключову роль у забезпеченні потреб населення, сільського господарства, промисловості та екосистем.

Особливої актуальності проблема набуває в умовах зростаючої водної вразливості південних і східних регіонів країни, де прогнозується суттєве зменшення водного стоку, що може призвести до дефіциту води, погіршення санітарно-гігієнічного стану водних об'єктів, обмеження у водопостачанні та зрошенні. У зв'язку з цим виникає необхідність оцінки можливого впливу зміни клімату на водний стік річок України в найближчій і довгостроковій перспективі. Це дозволить розробити адаптаційні заходи для водогосподарського комплексу та забезпечити сталий розвиток регіонів.

**Об'єкт дослідження** - водозбірні басейни основних річок України, зокрема Дніпра, Дністра, Південного Бугу, Сіверського Дінця та їх приток.

**Предмет дослідження** - закономірності впливу зміни клімату на об'ємні, сезонні та просторові характеристики водного стоку річок України в умовах сучасних і прогнозованих кліматичних змін.

**Метою дослідження** є кількісна оцінка змін водного стоку річок України під впливом зміни клімату на основі гідрологічного моделювання з використанням сучасних кліматичних проєкцій.

### **Завдання дослідження:**

1. Провести аналіз сучасних наукових досліджень щодо впливу зміни клімату на гідрологічні процеси.

2. Визначити роль кліматичних чинників у формуванні водного стоку річок України.
3. Ознайомитися з методами гідрологічного моделювання для дослідження водного режиму.
4. Підібрати актуальні кліматичні проєкції для регіонів України.
5. Виконати калібрування гідрологічної моделі для обраних річкових басейнів.
6. Провести моделювання водного стоку.
7. Оцінити зміну середнього річного та сезонного розподілу стоку для різних кліматичних сценаріїв.

**Методи дослідження:**

- аналіз літературних джерел та наукових праць;
- гідрологічне моделювання з використанням моделі SWAT;
- робота з кліматичними даними та сценаріями (SSP1\_2.6, SSP5\_8.5);
- статистичний аналіз результатів моделювання;

## РОЗДІЛ 1

### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗМІНИ КЛІМАТУ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ГІДРОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

#### 1.1. Огляд виконаних досліджень за темою магістерської роботи

Проблема впливу зміни клімату на водний стік річок України є актуальною та широко досліджується як вітчизняними, так і зарубіжними вченими. Зміна кліматичних умов, зокрема підвищення температури повітря та зміни у розподілі опадів, суттєво впливає на гідрологічний режим річкових басейнів, що вимагає комплексного аналізу та прогнозування майбутніх змін.

У світовій науковій літературі широко досліджується питання глобального потепління та його впливу на гідрологічні процеси (рис.1.1).



Рис.1.1. Схема глобального кругообігу води, яка формує гідрологічні процеси [5].

Міжурядова група експертів з питань змін клімату (ІРСС) у своїх доповідях наголошує на тому, що підвищення температури та зміни в режимі опадів призводять до трансформації водного балансу річкових систем у різних регіонах світу. Зокрема, дослідження ІРСС вказують на зростання частоти

екстремальних погодних явищ, що безпосередньо впливають на водний стік, провокуючи частіші паводки або, навпаки, періоди низької водності.

Серед європейських досліджень важливими є роботи, проведені в межах програм Європейського Союзу, таких як Horizon 2020, що вивчають кліматичні сценарії та їхній вплив на водні ресурси. Результати цих досліджень показують, що для більшості країн Європи, зокрема й України, характерним є поступове зростання температури, нерівномірний розподіл опадів і зміни у сезонності водного стоку.

В Україні проблематика впливу зміни клімату на водний режим річок активно вивчається у наукових установах, зокрема в Інституті водних проблем і меліорації НАН України, Центральній геофізичній обсерваторії імені Бориса Срезневського, Інституті гідробіології НАН України, а також у профільних кафедрах університетів.

Згідно з даними Національної метеорологічної служби Великої Британії (Наслідки зміни клімату: Україна, 2010), у країнах Центральної та Східної Європи, включно з Україною, прогнозується скорочення річного стоку в літній період до середини XXI століття на 50%. Дослідники Дрезденського університету (Pluntke et al., 2010) оцінюють, що до 2080 року водний стік у басейні Західного Бугу може зменшитися на 24,5–28% через вплив кліматичних змін.

Аналіз потенційних змін водних ресурсів України в умовах глобального потепління було здійснено кафедрою метеорології та кліматології Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Використовуючи водно-балансовий метод, дослідники (Сніжко та ін., 2012) залучили прогнозні дані щодо температури повітря та опадів на XXI століття відповідно до сценарію глобального розвитку A1B. Ці кліматичні прогнози були розраховані спеціалістами УкрГМІ із застосуванням регіональної моделі REMO та даних світового кліматичного центру CRU (Краковська та ін., 2008).

Отримані результати свідчать про тенденцію до зменшення водного стоку в Україні протягом XXI століття (за винятком басейнів річок,

розташованих у межах Українських Карпат і Закарпаття), причому прогнозоване скорочення може сягати 25–50%.

Вплив зміни клімату на водні ресурси Європи представлений у дослідженнях, в яких використовувалися гідрологічні моделі континентального та глобального масштабу (Donnelly et al., 2017; Mentaschi et al., 2019; van Vliet et al., 2015). Дві з них розглядали територію України лише частково, і лише остання охоплювала всю країну. Також існує дослідження, присвячене оцінці продуктивності ансамблю глобальних гідрологічних моделей у 57 великих річкових басейнах світу з подальшим їх застосуванням для оцінки впливу на клімат з урахуванням вагових коефіцієнтів (Krysanova et al., 2020), де охоплено невеликі частини території України.

У дослідженні van Vliet та ін. (2015) автори оцінили зміни річкового стоку, змодельовані моделями VIC та E-NHYPE на основі скоригованих зсувом МОЦК. Результати для RCP 8.5 показують переважно зменшуваний сигнал змін, що варіюється від +5 до -40 % для 2050-х років на більшій частині України [1, ст. 2].

Сніжко С. І. дослідив басейн річки Тетерів, розташований на півночі України в межах трьох адміністративних районів на площі 15 300 км<sup>2</sup>. Тетерів є правою найбільшою притокою річки Дніпро, яка є четвертою за довжиною річкою Європи. Водні ресурси регіону інтенсивно використовуються в промисловості, комунальній інфраструктурі та сільському господарстві.

Для успішного проведення дослідження було застосовано комплексну екогідрологічну модель SWIM з добовим часовим кроком, оскільки ця модель раніше використовувалася для оцінки впливу на клімат у багатьох подібних річкових басейнах на європейській території. Модель було створено, відкалібровано та валідовано для гідропосту Іванків, розташованого поблизу витoku річки Тетерів. Коефіцієнт ефективності Неша-Саткліффа для періоду калібрування становить 0,79 (0,86), а відсоткова похибка - 4,9 % (-3,6 %) з добовим (місячним) часовим кроком. [2].

Подібні результати були отримані науковцями Одеського державного екологічного університету (Loboda et al., 2013). Використовуючи водно-балансову модель та кліматичні сценарії РТК4.5 і РТК8.5 (РТК – траєкторія концентрацій парникових газів), вони дійшли висновку, що до середини ХХІ століття водні ресурси на рівнинній частині України значно скоротяться, зокрема на південному сході їх обсяг може зменшитися до 70%. Водночас у регіоні Українських Карпат прогнозується стабілізація, а подекуди навіть збільшення водних ресурсів. Дослідження співвідношення теплових і вологісних ресурсів вказує на тенденцію до посилення посушливості клімату та розширення територій із недостатнім зволоженням.

Робота Н. С. Лободи та М. А. Козлова (Лобода і Козлов, 2020), у якій застосовувалася водно-балансова модель «клімат – стік» разом із репрезентативними траєкторіями концентрацій парникових газів (РТК), засвідчила, що до 2050 року за сценарієм РТК4.5 скорочення водних ресурсів може досягти 50–60% на півдні та 10% на півночі. За сценарієм РТК8.5 прогнозується ще суттєвіше зменшення: на півдні втрати можуть сягати 60%, а на півночі — 30–40%. Територія, де можливе зростання водних ресурсів за цим сценарієм, обмежується Буковиною. Аналіз індексів зволоженості та посушливості показує, що в Українських Карпатах продовжить існувати зона надмірного зволоження. Проте баланс між опадами та випаровуванням зміниться, що може призвести до скорочення водних ресурсів річок цього регіону.

Ю. В. Божок (Божок, 2015) досліджував вплив глобального потепління на водні ресурси України загалом та Північно-Західного Причорномор'я зокрема. Згідно з отриманими результатами, упродовж ХХІ століття в більшості регіонів України (за винятком окремих річкових басейнів у Карпатах і Закарпатті) водний стік може зменшитися на 25–50%. Основним чинником цього процесу стане підвищення температурного режиму, що відбуватиметься на тлі відносно незначних змін у кількості опадів (до  $\pm 10\%$ ). За сценарієм

РТК4.5 можлива тенденція до збільшення водних ресурсів у Карпатах, проте вона не охоплюватиме Закарпаття [1].

Порівняльне дослідження Сніжка С. І та ін. щодо формування паводків в умовах зміни клімату в період з 1960 по 2015 роки показує відмінності в сезонності паводків в Україні та Австрії. В Україні більшість паводків припадає на лютий-травень, тоді як в Австрії - на травень-жовтень. Це пов'язано з тим, що весняні паводки на більшості рівнинних річок України спричинені таненням снігу, а літні паводки в Австрії здебільшого викликані сильними опадами [7].

Аналіз трендів показує, що протягом досліджуваного періоду (1960-2015 рр.) на більшості річок України (85,7% водомірних постів) спостерігається тенденція до зменшення амплітуди паводків, причому близько 40% з них - до значного зменшення. Це зменшення в основному пов'язане з меншою висотою снігового покриву та менш інтенсивним таненням снігу. На противагу цьому, величина паводків на австрійських річках збільшилась на 75,3% водомірних постів, з яких 20,3% показують статистично значущі позитивні тенденції. Ці збільшення в основному пов'язані зі змінами погодних умов [22].

Результати досліджень вказують на наявність двох протилежних тенденцій зміни водного стоку досліджуваних річок у середній (2030 р.) та довгостроковій перспективі (2050 р.). Збільшення водного стоку щодо норми стоку очікується для річок: Ільця, Чорнява і Путила. Зменшення водного стоку щодо норми стоку очікується для річок: Прут, Сірет, Кам'янка. Для Черемошу, а також Чорного та Білого Черемошу це зменшення буде практично не вираженим. За даними розрахунків в середньому для групи досліджених річок басейнів Сірету та Пруту зменшення стоку буде становити 3,24 % (2030 р.) та 3,22% (2050 р.).

Отримані результати характеризуються достатньою точністю, що базується на якості вихідних гідрологічних і метеорологічних даних, результатах кліматичного прогнозу та методики водно-балансового моделювання і можуть бути використаними для розробки заходів щодо адаптації водного господарства регіону до очікуваних кліматичних змін. Проте

автори не відкидають необхідності застосування більш точних чисельних методів довгострокового прогнозування водного стоку даних річок у близькому майбутньому [33, с.32].

Зміна клімату є одним із найактуальніших викликів сьогодення, який суттєво впливає на водні ресурси України. Очікується, що внаслідок глобального потепління відбудеться:

- Зміна сезонного розподілу опадів: збільшення їх кількості взимку та зменшення влітку.
- Зростання температури повітря, що призведе до інтенсифікації випаровування та транспірації.
- Зміна частоти та інтенсивності екстремальних гідрометеорологічних явищ (повеней, посух).

Ці фактори обумовлюють ймовірне зменшення водного стоку річок України, що може мати значні негативні наслідки для економіки, екології та життя людей.

## 1.2. Оцінка ролі кліматичного чинника у формуванні водного стоку річок України

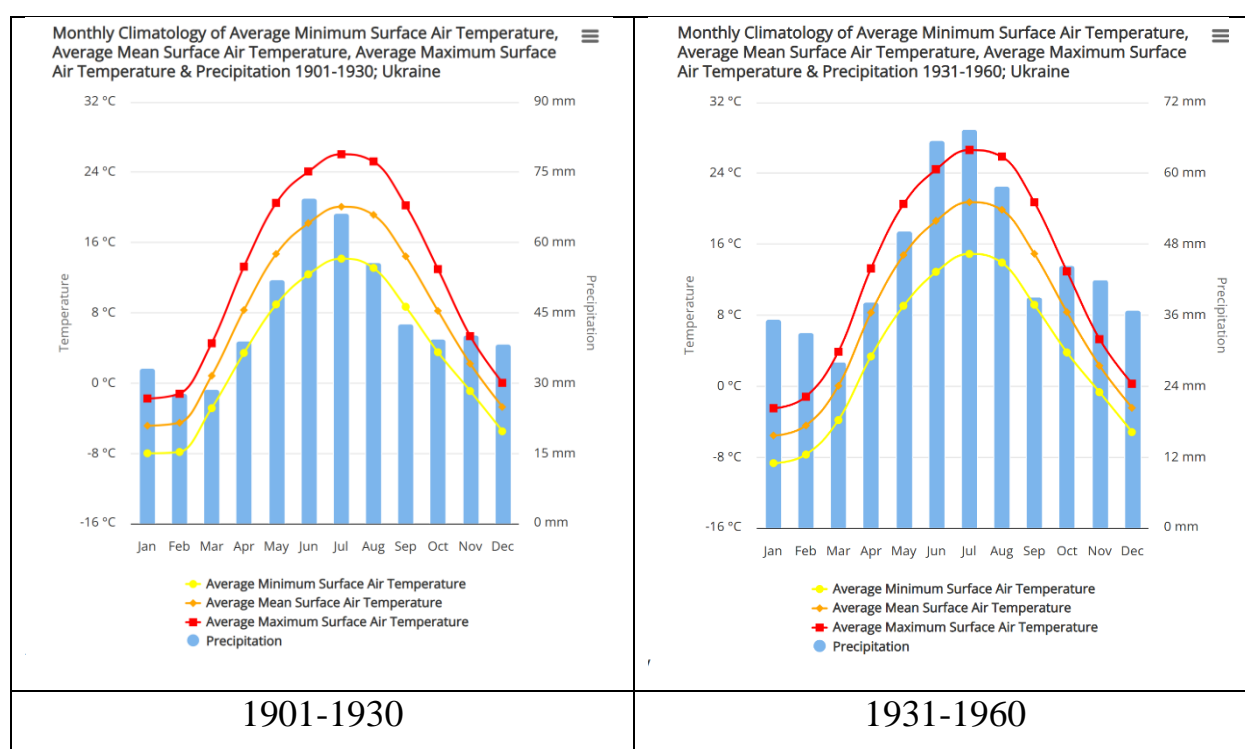
Формування водного стоку річок є складним процесом, що залежить від різних природних і антропогенних факторів. Одним із ключових чинників є клімат, який визначає основні гідрологічні характеристики території. Вплив кліматичних змін на гідрологічні процеси є особливо актуальним у зв'язку з глобальним потеплінням, що спостерігається впродовж останніх десятиліть.

До основних кліматичних факторів, що визначають формування водного стоку річок України, належать температура повітря, кількість та інтенсивність опадів, вологість повітря, сонячна радіація та вітровий режим. Температурний режим має значний вплив на процеси випаровування та танення снігу. Підвищення температури спричиняє швидше танення снігового покриву, що може призводити до весняних паводків. Окрім цього, вищі температури

сприяють зростанню випаровування, що зменшує кількість доступної води в річкових системах.

Опади є основним джерелом поповнення водних ресурсів, тому їхня кількість, інтенсивність і розподіл відіграють критичну роль у формуванні стоку. Надмірні опади можуть спричинити паводки, тоді як їхній дефіцит призводить до зниження рівня води у річках і розвитку посушливих періодів. Вологість повітря впливає на процеси конденсації та випадіння опадів, а також на рівень випаровування. Сонячна радіація визначає енергетичний баланс регіону, а вітровий режим сприяє транспортуванню вологи в атмосфері, що може впливати на випадіння опадів у різних частинах країни.

Кліматичні характеристики України для різних 30-річних кліматичних періодів представлені на рис.1.1.



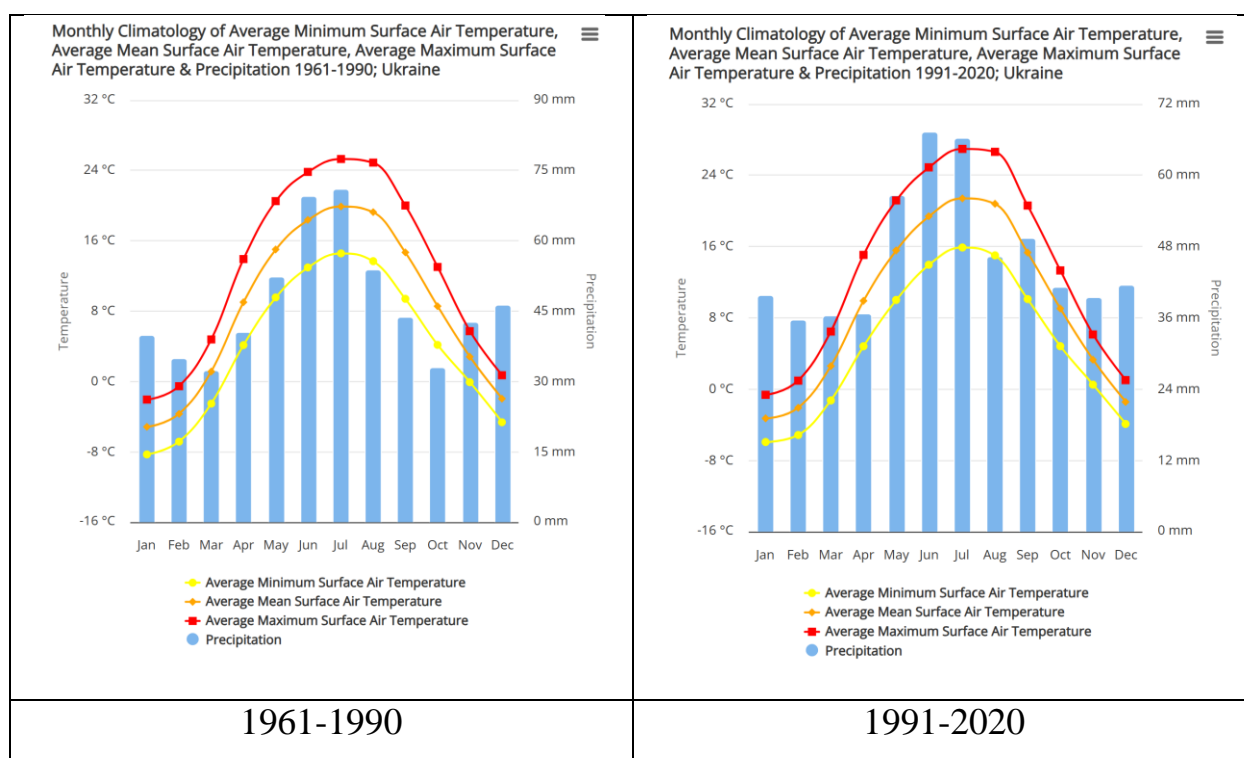


Рис.1.1 - Середні місячні норми середньої, мінімальної та максимальної температури та опадів для території України обчислені за даними Climatic Research Unit (CRU) of University of East Anglia з розрахункової мережі  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (50 км x 50км). Побудовано за даними [9].

Глобальні кліматичні зміни, що спостерігаються у XX-XXI століттях, суттєво впливають на гідрологічні процеси в Україні. Зокрема, підвищення середньорічної температури повітря (рис.1.2) спричиняє зміну режиму танення снігу та зміну сезонного розподілу опадів.

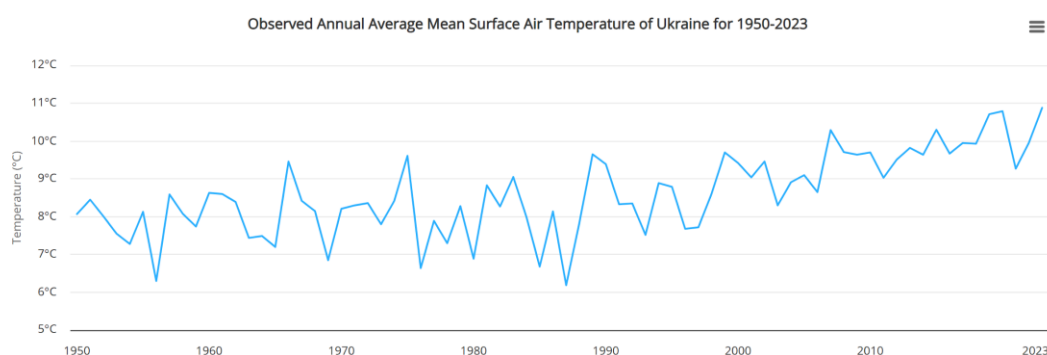


Рис.1.2 - Зміна середньої річної температури повітря в Україні протягом 1950-2023 рр. Побудовано за даними проекту ERA5 [9].

В останні десятиліття в Україні спостерігається тенденція до зростання зимових температур, що призводить до меншої кількості снігового покриву та збільшення зимового стоку річок.

Динаміка опадів також зазнає змін (рис.1.3): у деяких регіонах спостерігається їх зменшення, тоді як в інших – збільшення, причому зростає частота та інтенсивність екстремальних опадів. Це може спричиняти паводки, ерозійні процеси та нестабільність у водному балансі річок. Крім того, зростає частота посух, що негативно позначається на водних ресурсах та водопостачанні населення й аграрного сектору.

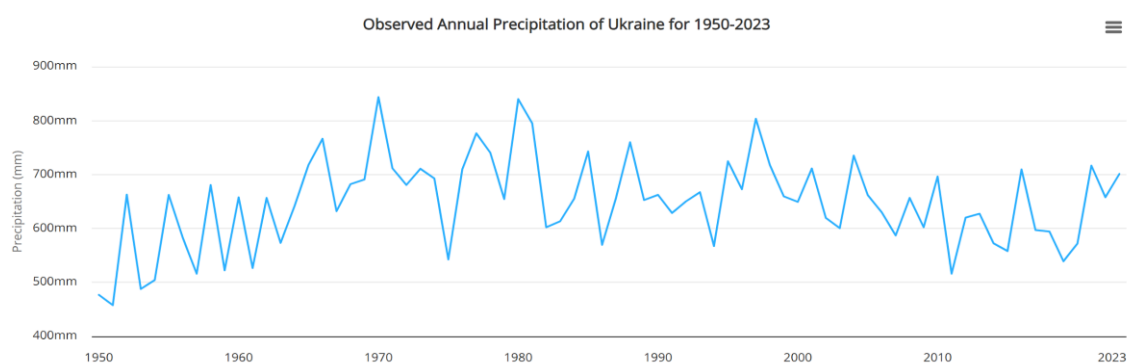


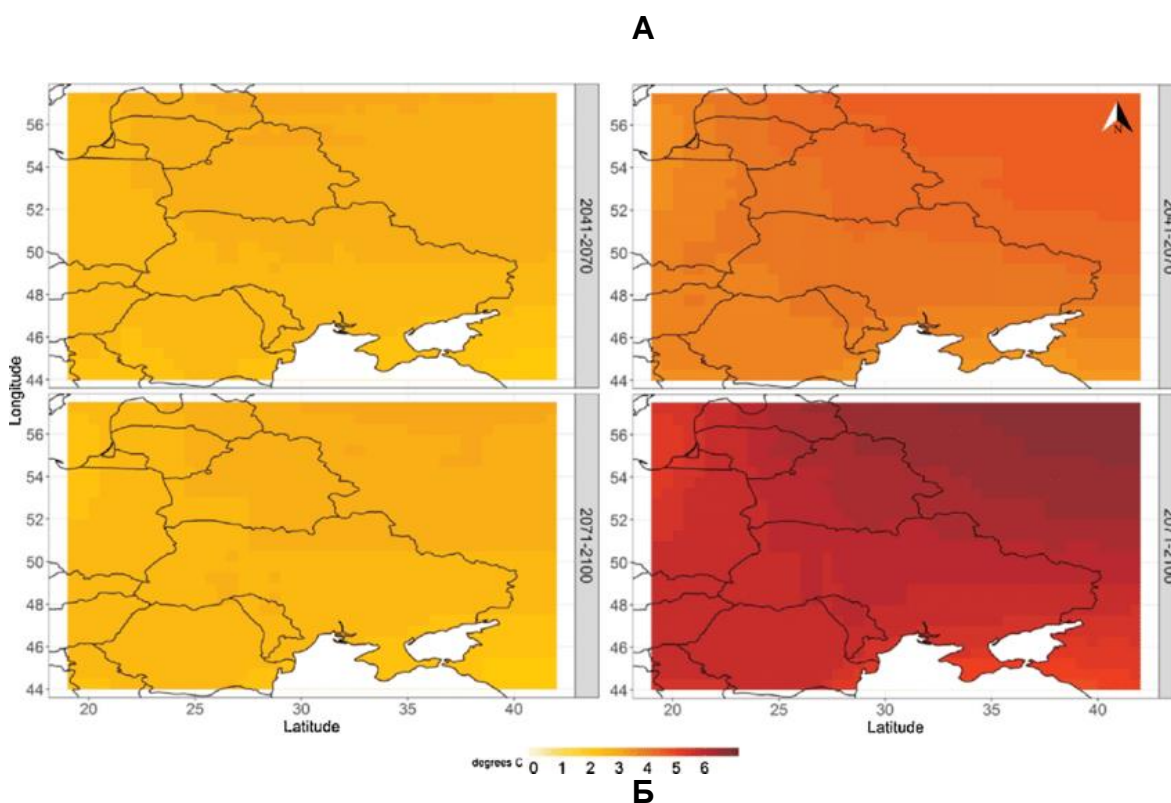
Рис.1.3 - Динаміка опадів для території України протягом 1950-2023 рр. Побудовано за даними проекту ERA5 [32].

У майбутньому теж очікуються зміни гідрокліматичних параметрів клімату, від яких залежить формування водного стоку річок.

Зміни прогнозованої середньорічної температури, усередненої за чотирима скоригованими на зміщення глобальними кліматичними моделями (GCM) до кінця століття за RCP 2.6 та RCP 8.5, представлені на рис.1.4 (А). Зміни показують збільшення в обох часових періодах за обома RCP по всій території України, зростаючи з півдня на північний схід досліджуваної області. За RCP 2.6 збільшення коливається від 2,1 °C до 2,8 °C для обох часових періодів. За RCP 8.5 різниця в підвищенні температури між двома часовими

періодами набагато помітніша. У період середньої перспективи прогнозується підвищення температури з 3,1 °С до 4,5 °С у досліджуваному регіоні.

Кількість опадів за RCP 2.6 демонструє невелике або помірне (до 10%) збільшення по всій досліджуваній території для обох майбутніх періодів (рис. 1.4(Б)). Зміни за RCP 8.5 варіюються від незначного зниження до помірного зростання (від -5 до +10 %) у період середньої перспективи. Наприкінці століття прогнозується зменшення річної кількості опадів до 12–14 %.



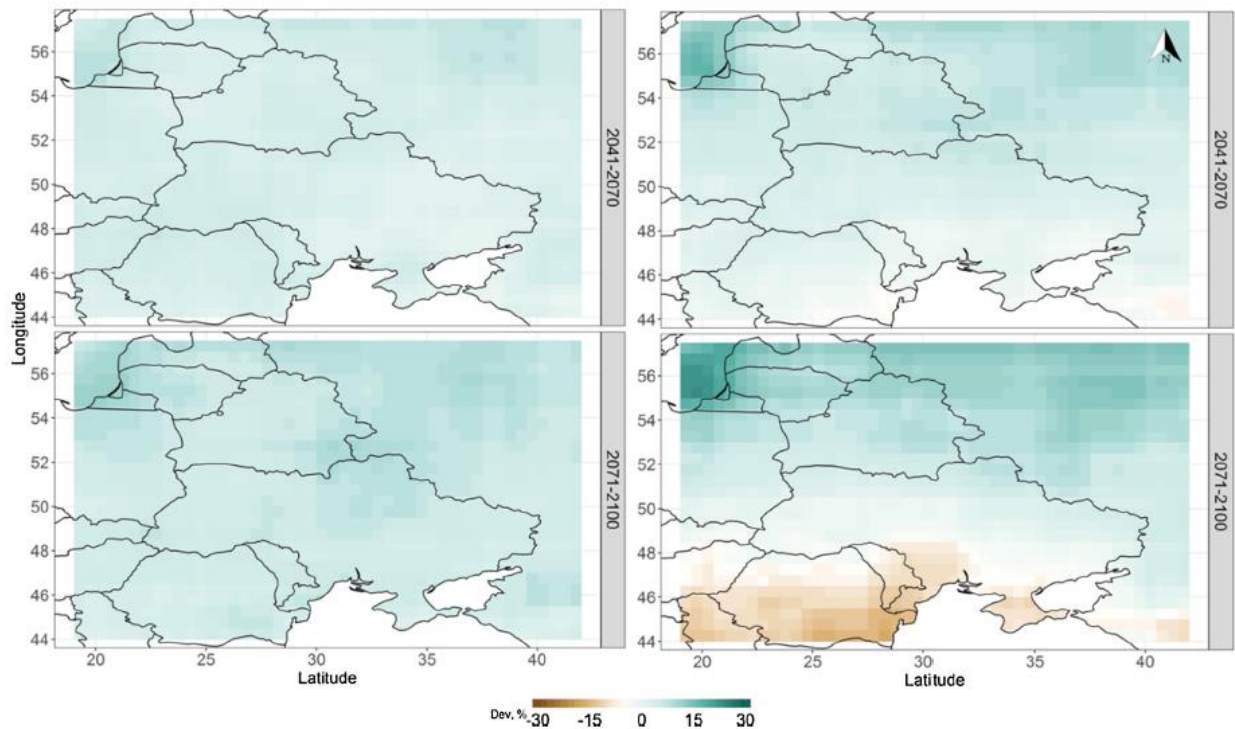


Рис.1.4 - А. Проекції (прогнозовані зміни) середньорічної температури на два майбутні періоди (2041–2070 та 2070–2100) у порівнянні з референтним періодом (1971–2000) згідно з RCP 2.6 (ліворуч) та RCP 8.5 (праворуч).

Б. Проекції (прогнозовані зміни) річної кількості опадів на два майбутні періоди (2041–2070 та 2070–2100) у порівнянні з референтним періодом (1971–2000) згідно з RCP 2.6 (ліворуч) та RCP 8.5 (праворуч). Чорні лінії позначають кордони країн.

Сезонні зміни клімату впливають на розподіл водного стоку впродовж року. Наприклад, унаслідок підвищення температури зими та ранньої весни збільшується зимовий стік, що може призводити до весняного дефіциту води. Літній водний стік, навпаки, може скорочуватися через підвищене випаровування та зменшення кількості опадів.

Водний стік в Україні має регіональні особливості, що визначаються гідрокліматичними зонами країни: Полісся, Лісостеп, Степ, Карпати та Крим. У межах Полісся, де кількість опадів є відносно високою, водний стік значною мірою зумовлений атмосферними опадами та водно-болотними угіддями. Лісостеп характеризується помірним рівнем опадів та змішаним типом живлення річок, тоді як у степовій зоні переважає низький рівень опадів і висока інтенсивність випаровування, що зменшує водність річок.

Карпатський регіон відзначається найбільшими об'ємами водного стоку через велику кількість атмосферних опадів та гірський рельєф, що сприяє формуванню стрімких паводків [32]. Натомість у Криму, де кількість опадів обмежена, водний стік залежить від рідкісних опадів та підземного живлення.

Вплив кліматичних змін на основні річкові басейни України також має свої особливості. Для Дніпра характерні значні коливання рівня води, що залежать від опадів та танення снігу. Дністер та Південний Буг, що мають змішане живлення, зазнають впливу змін у розподілі опадів. Річки Сіверського Дінця та степової зони зазнають найбільшого впливу посух, що знижує водність регіону. Річки Карпат часто потерпають від паводків, спричинених інтенсивними опадами.

Для оцінки впливу кліматичних змін на водний стік використовують різні методи. Один із них – аналіз багаторічних рядів спостережень, що дозволяє виявити тренди у зміні температури, кількості опадів та рівня води у річках.

Кліматичне моделювання є ще одним важливим інструментом, що дає змогу прогнозувати можливі зміни у водному балансі річок за різних сценаріїв кліматичних змін. Для цього використовують глобальні та регіональні кліматичні моделі, що враховують динаміку температури, опадів та інших кліматичних параметрів.

Окрім цього, гідрологічні моделі дають змогу прогнозувати майбутні зміни водного стоку з урахуванням кліматичних сценаріїв. Вони застосовуються для оцінки впливу підвищення температури, зміни інтенсивності опадів та інших факторів на рівень води у річках.

Висновок до розділу 1. Таким чином, клімат є одним із найважливіших чинників, що визначають водний стік річок України. Його вплив є багатогранним і варіюється залежно від регіону, пори року та глобальних кліматичних тенденцій. Оцінка цього впливу є критично важливою для розуміння сучасних і майбутніх змін у водних ресурсах країни та розробки ефективних стратегій управління водними ресурсами.

## РОЗДІЛ 2

### ВИВЧЕННЯ МЕТОДОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КЛІМАТУ НА ВОДНІ РЕСУРСИ

#### 2.1 Гідрологічне моделювання

Протягом останніх десятиліть спостерігаються зміни клімату в Європі і, очікується, що ці зміни будуть ще більшими в майбутньому. Глобальне потепління призведе до змін у водному циклі, які, ймовірно, вплинуть на доступність води для різних секторів економіки, які цього її потребують (енергетика, сільське господарство, лісове господарство тощо). Таким чином кліматичні зміни та наслідки цих змін в майбутньому можуть стати великою проблемою та першочерговим політичним питанням. Тому важливою на сьогодні є можливість прогнозування кліматичних змін та їх наслідків, щоб людство було готове до них.

Незважаючи на потужну підтримку наукового співтовариства з питань зміни клімату та його впливу в Європі, невизначеність у прогнозованих гідрологічних впливах на майбутнє є великою. Багато досліджень показують великі розбіжності в прогнозах, що провокує дискусії щодо надійності змодельованих результатів впливу змін клімату на гідрологічний режим річок [2].

Гідрологічне моделювання є ключовим інструментом для аналізу впливу кліматичних змін на водні ресурси, особливо в таких кліматично уразливих регіонах, як Україна. Для оцінки змін у водозабезпеченні основних річкових басейнів України слід використовувати комплексну гідрологічну модель.

##### 2.1.1 Глобальні гідрологічні моделі та кліматичні дані

У гідрологічному моделюванні для оцінки впливу кліматичних змін на водні ресурси широко застосовуються глобальні гідрологічні моделі (GHMs) та кліматичні дані, отримані з глобальних кліматичних моделей (GCMs) (рис.2.1) Найбільш доцільним вважаємо використовувати поєднання цих інструментів для прогнозування водного режиму річок в умовах зміни клімату [2].

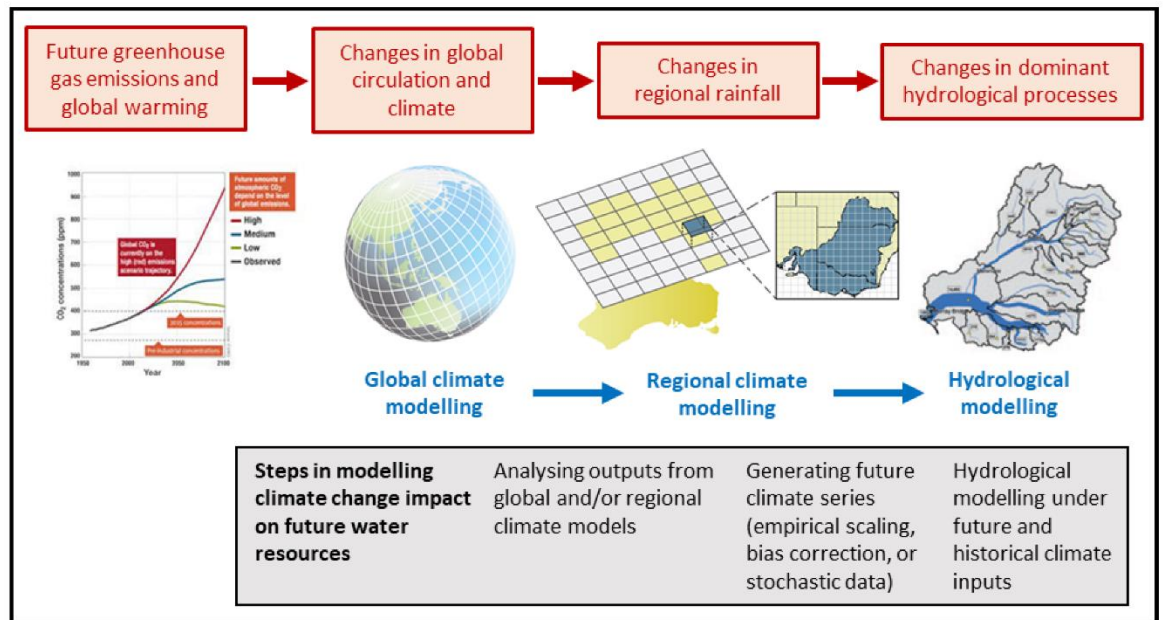


Рисунок 2.1. Схематичне представлення процесу моделювання впливу клімату на водні ресурси [26].

Глобальні гідрологічні моделі дозволяють відтворювати природні процеси в масштабі річкових басейнів, зокрема такі, як стік, випаровування, інфільтрація та транспірація. Одними з найпоширеніших моделей є SWAT (Soil and Water Assessment Tool) та HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), які використовуються для моделювання водного балансу різних річкових систем. У дослідженні для річкових басейнів України доцільно застосувати ці, або аналогічні моделі, моделі, щоб визначити потенційні зміни водного стоку в контексті кліматичних змін [2].

Кліматичні дані для моделювання отримувалися з глобальних кліматичних моделей, що використовують сценарії зміни клімату (Representative Concentration Pathways, RCP). Існує декілька сценаріїв (RCP 2.6, RCP 4.5 та RCP 8.5), які охоплюють різні рівні концентрації парникових газів у

майбутньому. Ці сценарії базуються на різних прогнозах емісії парникових газів та їх впливу на підвищення глобальної температури.

У результаті застосування GCMs виявлено, що підвищення температури спричиняє зміни у гідрологічному циклі, зокрема зміщення сезонності стоку, збільшення частоти екстремальних погодних явищ (посухи, повені), а також зменшення водозабезпеченості у літні місяці. Це особливо актуально для річкових басейнів України, де зміни в кліматі можуть значно вплинути на водний баланс.

Застосування глобальних гідрологічних моделей та кліматичних даних дозволяє отримати детальну картину потенційних змін у водних ресурсах, що є основою для розробки адаптаційних стратегій в умовах зміни клімату.

### 2.1.2 Глобальна гідрологічна модель WaterGAP2

WaterGAP2 — одна з провідних глобальних гідрологічних моделей (GHMs), яка використовується для оцінки водних ресурсів на глобальному та регіональному рівнях. Ця модель розроблена для моделювання як природного стоку, так і водокористування, з метою оцінки змін у водному балансі під впливом різних факторів, включно з кліматичними змінами та людською діяльністю. Ця модель дозволяє прогнозувати водний баланс, враховуючи як природні процеси (стік, випаровування, інфільтрація), так і вплив людини (водокористування в сільському господарстві, промисловості та побуті). Вона обчислює часові ряди швидкого поверхневого та підземного стоку, поповнення ґрунтових вод та річкового стоку, а також зміни запасів води в ґрунтовому покриві, снігу, ґрунті, підземних водах, озерах, водно-болотних угіддях та річках (рис.2.2).

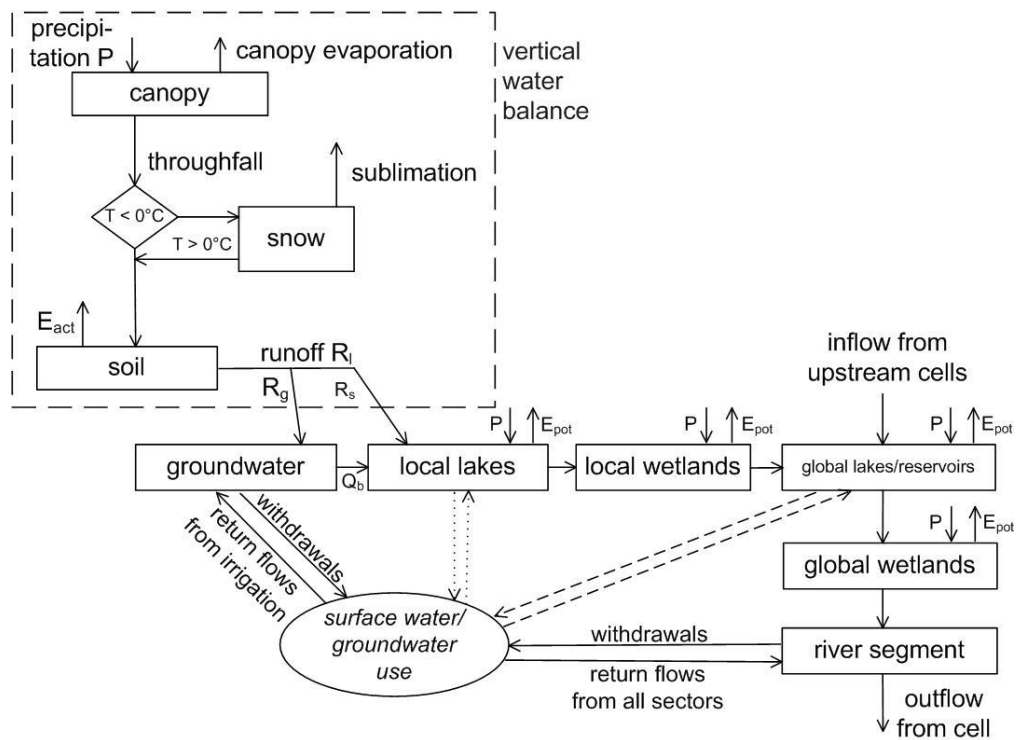


Рисунок 2.2. Схематичне представлення розрахункових модулів моделі WaterGAP2 [27].

WaterGAP2 моделює водні ресурси у всіх великих річкових басейнах світу з просторовою роздільною здатністю близько 50 км<sup>2</sup>. Це дозволяє оцінювати водний стік і використання води як на глобальному рівні, так і для окремих країн чи регіонів [7].

Основні компоненти моделі:

Моделювання природного стоку - WaterGAP2 моделює ключові гідрологічні процеси, такі як стік, випаровування, інфільтрація, та взаємодія підземних і поверхневих вод. Це дозволяє точно визначати водний баланс для кожного річкового басейну.

Моделювання водокористування - модель також оцінює водокористування у різних секторах, включаючи сільське господарство, промисловість та побутове споживання. Вона враховує різні види водоспоживання, такі як зрошення, промислове споживання, охолодження на електростанціях та інші. Це дає змогу аналізувати, як зміни у використанні води впливають на доступність водних ресурсів.

Кліматичні сценарії - WaterGAP2 використовує кліматичні дані з глобальних кліматичних моделей (GCMs) для моделювання впливу

кліматичних змін на водні ресурси. Враховуються сценарії зміни клімату, такі як RCP (Representative Concentration Pathways), що дозволяє оцінювати різні варіанти розвитку подій [7].

Оцінка водного стресу - один із ключових показників, який розраховується за допомогою WaterGAP2. Цей показник відображає співвідношення між водопостачанням і попитом у різних регіонах. Він дозволяє оцінювати ризики вододефіциту та ідентифікувати регіони, які найбільше вразливі до зміни клімату. Модель визначає регіони, де попит на воду перевищує природне водопостачання. Це особливо актуально для регіонів з ризиком вододефіциту через зміну клімату або збільшення населення.

WaterGAP2 дозволяє прогнозувати сезонні зміни стоку в річках, оцінювати вплив посух та зменшення опадів у літні місяці, моделювати вплив людської діяльності на водні ресурси, зокрема зрошення та водопостачання в містах. Важливість моделі WaterGAP2 полягає в її здатності поєднувати кліматичні проєкції та водний баланс для підтримки планування водних ресурсів в умовах зміни клімату [1].

Модель WaterGAP2 може бути застосована для оцінки водного балансу основних річкових басейнів України (Дніпро, Дністер, Південний Буг, Сіверський Донець). Модель дозволяє прогнозувати зміни у водопостачанні під впливом кліматичних змін та визначати області підвищеного ризику водного дефіциту. Це особливо важливо для адаптації України до зміни клімату та планування водних ресурсів у майбутньому.

## 2.2 Використання кліматичних даних та підбір кліматичних проєкцій

Оцінка впливу кліматичних змін на водні ресурси вимагає використання надійних кліматичних даних та сценаріїв, які відображають майбутні зміни в температурі, опадах, випаровуванні та інших кліматичних показниках. У глобальних гідрологічних моделях, таких як WaterGAP2, особливу роль відіграє

правильний підбір кліматичних проєкцій, що дозволяє прогнозувати майбутні зміни у водному балансі річкових басейнів [5].

Для правильної побудови моделі важливі кліматичні дані, які використовуються як вхідні параметри для гідрологічних моделей і включають:

Температуру повітря (середньорічна, місячна, денна): зміни температури впливають на випаровування, танення снігу та льоду, а також на швидкість водного кругообігу.

Опади: моделюються кількість і розподіл опадів протягом року, що впливає на стік річок, рівень ґрунтових вод та водні ресурси в цілому.

Вологість та швидкість вітру: ці фактори впливають на випаровування та транспірацію, що є важливими показниками у водному балансі.

Сніговий покрив: у районах зі значним сніговим покривом, як-от Карпати, кліматичні дані про товщину снігу та періоди танення є важливими для прогнозування стоку навесні.

В якості «вхідної» інформації для гідрологічної моделі було використано кліматичні проєкції (середні добові значення температури, опадів, та сонячної радіації) з проєкту «Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project» (ISIMIP, 2020), які були отримані з використанням глобальних моделей **HadGEM2-ES, MIROC5, IPSL-CM5A-LR and GFDL-ESM2M** (рис.2.2), відкориговані на основі даних реаналізу EWEMBI (Lange, 2018; Lange, 2019). Просторова роздільна здатність даних становить  $0,5 \times 0,5$  (рис.2.3).

Обрано два сценарії РТК (RCP): «м'який» сценарій РТК 2.6, який відповідно до Паризької угоди, передбачає зменшення викидів парникових газів та повернення до радіаційного впливу  $2,6 \text{ Вт/м}^2$  до 2100 р. та «жорсткий» сценарій РТК 8.5, який не враховує жодних заходів з адаптації, чи пом'якшення клімату.

Часові ряди можна розділити на дві частини: історичні симуляції (1861-2005 рр.) та прогнози з урахуванням викидів парникових газів, що охоплюють період 2006-2099 рр [7].



Рис.2.2 - Поєднання кліматичних моделей HadGEM2-ES, MIROC5, IPSL-CM5A-LR and GFDL-ESM2M з кліматичними проєкціями.

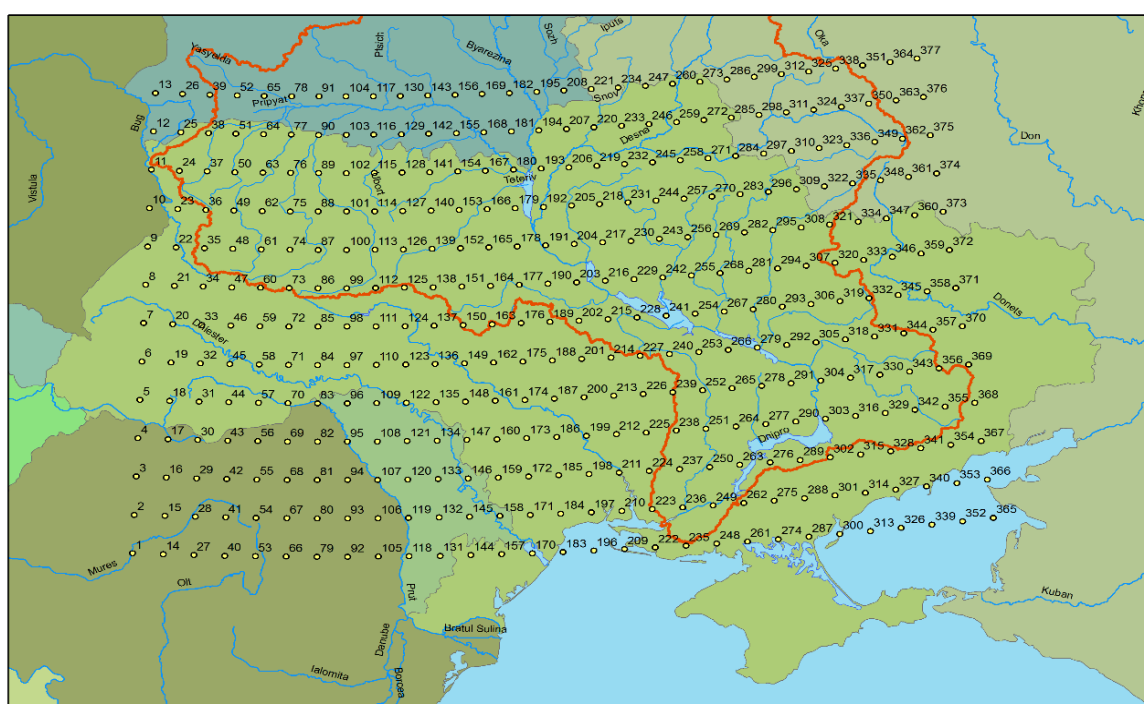


Рис. 2.3 - Розміщення вузлів регулярної сітки кліматичних даних з проекту ISIMIP

Для прогнозування майбутніх змін клімату використовуються кліматичні проєкції, які базуються на глобальних кліматичних моделях (GCMs). Ці моделі відображають різні сценарії емісій парникових газів, що призводять до зміни температури та кліматичних умов у довгостроковій перспективі.

RCP 2.6 — оптимістичний сценарій, що передбачає значне зниження викидів парникових газів, що обмежує підвищення температури до 2°C до кінця століття.

RCP 4.5 — сценарій помірного скорочення викидів, який прогнозує помірне потепління.

RCP 8.5 — песимістичний сценарій, за якого емісії залишаються на високому рівні, що може призвести до значного підвищення температури до 4°C і більше [7].

RCP 2.6 представляє найоптимістичніший сценарій, де концентрація парникових газів стабілізується за рахунок ефективних заходів зі скорочення викидів. Водночас сценарії RCP 4.5 і RCP 8.5 відображають середні та песимістичні прогнози, де збільшення концентрації парникових газів призводить до суттєвого підвищення температури. Ці сценарії використовуються для оцінки змін у гідрологічних процесах, таких як розподіл опадів, температурні зміни, та їх вплив на водозабезпечення в річкових басейнах [6].

Для України вибір кліматичних моделей здійснюється на основі оцінки їх точності в регіональному контексті. Найбільш відповідні моделі ті, що враховують вплив географічних та кліматичних особливостей регіону, таких як континентальний клімат, сезонність опадів і вплив на стік річкових басейнів.

Крім того, в дослідженнях можуть використовуватись дані регіональних кліматичних моделей (RCMs), які дозволяють уточнити кліматичні прогнози на рівні країни або окремих річкових басейнів, зокрема для Карпат та південних степових регіонів.

Кліматичні проєкції дозволяють виявити можливі ризики для водних ресурсів у різних сценаріях майбутнього розвитку клімату. Наприклад, у сценарії RCP 8.5 для України прогнозується значне зниження кількості опадів у літній період, що може призвести до вододефіциту, особливо в басейнах Південного Бугу та Дністра. Водночас збільшення опадів у зимовий період та швидке танення снігу може спричинити повені [7].

Для цього дослідження було обрано два сценарії РТК (RCP): «м'який» сценарій РТК 2.6, який відповідно до Паризької угоди, передбачає зменшення викидів парникових газів та повернення до радіаційного впливу 2,6 Вт/м<sup>2</sup> до

2100 р. та «жорсткий» сценарій РТК 8.5, який не враховує жодних заходів з адаптації чи пом'якшення клімату.

Використання кліматичних даних та відповідних проєкцій є важливим інструментом для розробки стратегії управління водними ресурсами, зокрема щодо адаптації до можливих сценаріїв змін клімату та запобігання водним кризам.

Основним завданням моделювання було оцінити вплив змін температури та опадів на водний режим річок у коротко- (2021-2050 рр.) та довгостроковій перспективі (2051-2079 рр.). Зокрема, було встановлено, що підвищення середньорічних температур і зміна режиму опадів призведе до значних змін у сезонності стоку. За результатами моделювання прогнозується, що протягом літніх місяців водний стік значно зменшиться, що може призвести до дефіциту водних ресурсів, особливо в південних регіонах України [3].

Окрім того, в моделюванні враховувалися особливості рельєфу, ґрунтового покриву та землекористування в басейнах, що дозволило точніше відобразити вплив зміни клімату на водні ресурси. Важливим результатом стало виявлення зони підвищеного ризику для сільськогосподарських регіонів, які залежать від зрошувальних систем, оскільки зміна клімату може призвести до дефіциту води в ключові періоди вегетації.

Таким чином, гідрологічне моделювання в рамках дослідження дозволяє прогнозувати потенційні ризики для водного забезпечення України та визначити необхідність адаптаційних заходів, таких як модернізація зрошувальних систем та раціоналізація використання водних ресурсів.

### 2.3 Вибір річкових басейнів, підготовка гідрологічних даних, калібрування гідрологічної моделі

Вибір річкових басейнів для дослідження здійснювався за чітко визначеними критеріями. Основними умовами були площа водозбору понад 10 000 км<sup>2</sup> та наявність безперервного ряду спостережень за водним стоком

протягом не менше 60 років (1961–2020). На основі цих критеріїв було відібрано 49 річок, які мають різну тривалість гідрологічних спостережень (рис.2.4).

Методологічна основа дослідження ґрунтується на аналізі даних водного стоку, отриманих із національних та міжнародних баз даних. Зокрема, використовувалися дані Глобального центру збору інформації про річковий стік (Global Runoff Data Centre, GRDC, 2023), багаторічні гідрологічні спостереження Бориса Срезневського Центральної геофізичної обсерваторії (ЦГО) в Україні, відомості з Державного кадастру України щодо використання водних ресурсів (портал відкритих даних, 2022), а також аналітичні звіти державних установ про стан і використання водних ресурсів України.

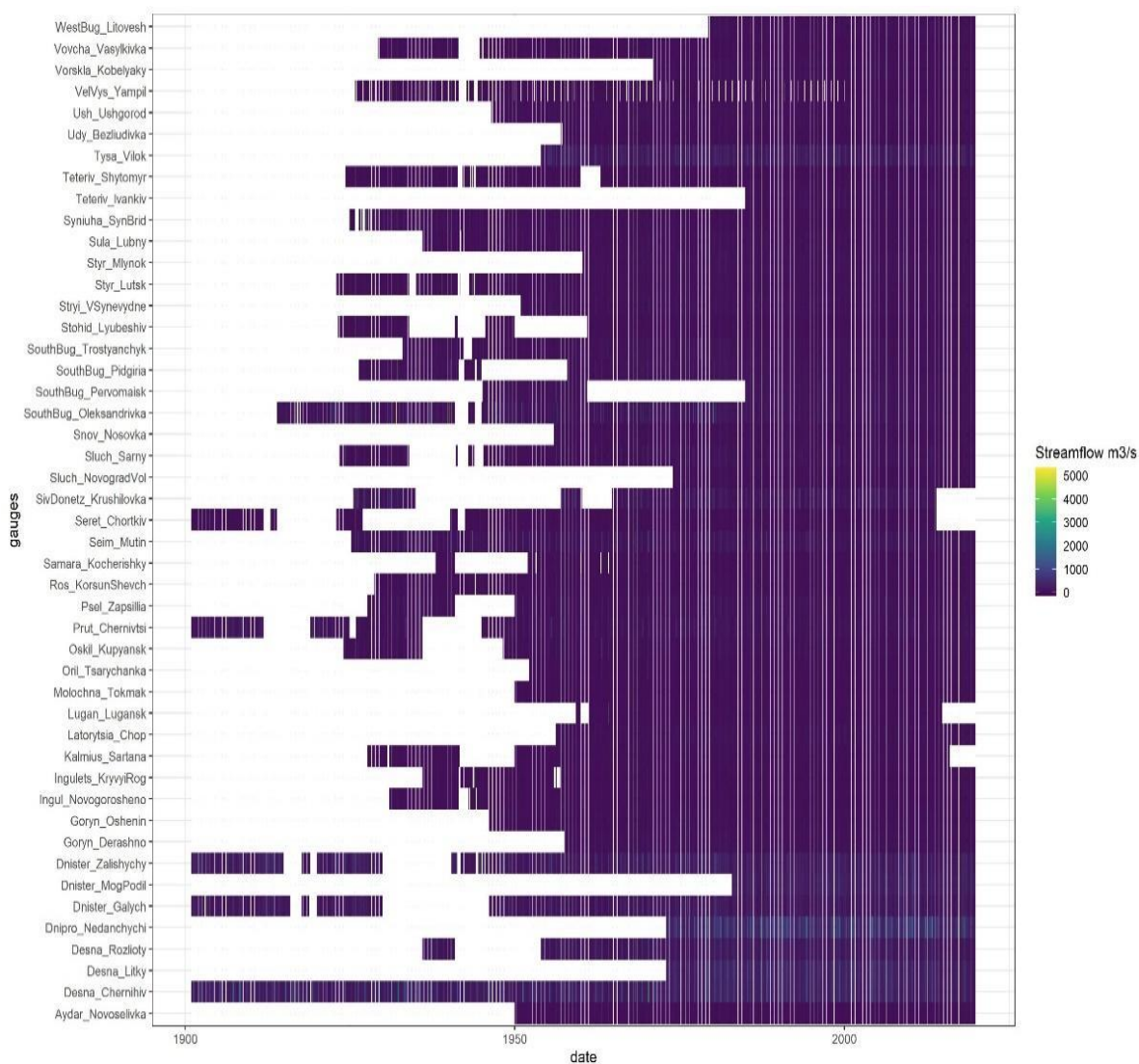


Рис. 2.4 - Перелік річок різних регіонів України, які досліджувалися. Тривалість періоду спостережень і середньорічна витрата ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

Окремо слід зазначити важливість створення цифрової бази даних водного стоку, що містить середньомісячні витрати води річок України за весь доступний період інструментальних спостережень.

Калібрування гідрологічної моделі є необхідним етапом для підвищення точності прогнозів водного стоку. Оцінка результатів калібрування за допомогою статистичних індексів дозволяє визначити відповідність моделі реальним даним. Отримані результати допоможуть у подальшому аналізі впливу змін клімату на водні ресурси України та розробці адаптаційних заходів для їх раціонального використання.

Висновок до розділу 2. Таким чином, в розділі 2 представлено результати вивчення процесу моделювання впливу клімату на водні ресурси. Розглянуті гідрологічні моделі, кліматичні моделі та проєкції. Обрано глобальну гідрологічну модель Water GAP2 як таку, що найкраще зарекомендувала себе у моделюванні водного стоку великих і середніх за величиною річок. На основі вивчення спеціальної літератури зроблено висновок, що гідрологічне моделювання є одним з основних інструментів, який дозволяє прогнозувати потенційні ризики для водного забезпечення України та визначити необхідність адаптаційних заходів, таких як модернізація зрошувальних систем та раціоналізація використання водних ресурсів.

### РОЗДІЛ 3

## МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОГО СТОКУ РІЧОК УКРАЇНИ ДЛЯ ПЕРІОДУ НАЙБЛИЖЧОЇ ТА ВІДДАЛЕНОЇ ПЕРСПЕКТИВИ

Гідрологічні моделі широко використовуються для розуміння процесів у водозбірних басейнах та прогнозування їхньої поведінки за різних умов, оскільки ці модельні прогнози корисні для планування та управління водними ресурсами на рівні річкового басейну.

Для оцінки можливих змін водного стоку річок України в майбутньому у співпраці з співробітником Потсдамського інституту дослідження впливу клімату доктором Юлієм Дідовцем було здійснено гідрологічне моделювання за допомогою WaterGAP2-2e—однієї з найпоширеніших моделей для оцінки водних ресурсів у глобальному масштабі. Дане моделювання дозволяє прогнозувати зміни річкового стоку під впливом кліматичних змін та соціально-економічних факторів.

Необхідною умовою для успішного моделювання впливу зміни клімату на водні ресурси є калібрування та валідація гідрологічної моделі з використанням даних регулярних спостережень.

Процес калібрування та валідації моделі є досить важливим етапом перед використанням її в дослідженнях. Моделі, які не відкалібровані з використанням даних інструментальних гідрологічних вимірювань з високою мірою ймовірності матимуть серйозні помилки (рис.3.1) і можуть стати причиною значних економічних збиткуів у разі використання їх результатів для впровадження економічних рішень.

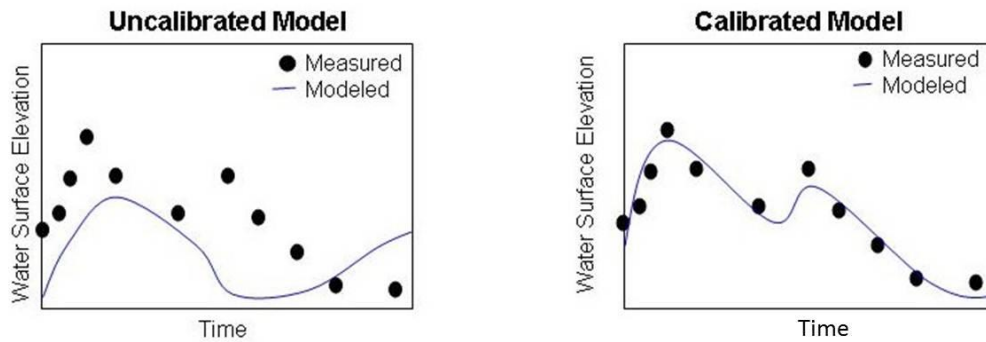


Рисунок 3.1 - Порівняння результатів каліброваної і некаліброваної моделі [25]

На даний момент не існує загальноприйнятої процедури або ж інструкції в науковій літературі для калібрування та валідації. Існує безліч точок зору розробників моделей та користувачів щодо виконання калібрування та перевірки моделі [25].

Калібрування моделі передбачає виконання процедури розрахунку спеціально передбаченого розробниками калібрувального коефіцієнта  $s$  на основі наявних фактичних даних про водний стік, кількість опадів та температурний режим повітря за певний період часу.

Період часу, за який використовуються вхідні дані досліджень для цих розрахунків, називається калібрувальним періодом. Від правильного вибору калібрувального періоду залежить точність розрахунків параметрів водно-балансової моделі та точність прогнозу водного стоку, який є кінцевою метою моделювання.

Вибраний калібрувальний період повинен забезпечувати створення репрезентативних вибірок гідрологічних і метеорологічних даних. Вибрані дані (часові ряди) повинні правильно відображати структуру генеральної сукупності із якої вони взяті. Щоб вибірка якомога точніше відображала структуру генеральної сукупності, вона повинна бути достатньо представницькою, або репрезентативною.

Як правило, репрезентативність вибірки досягається випадковим відбором варіант із генеральної сукупності. Це забезпечує рівні можливості для усіх членів генеральної сукупності потрапити до складу вибірки.

У гідрології репрезентативність рядів даних (статистичних вибірок) досягається не тільки за рахунок тривалості періоду спостережень, за який формується вибірка, а й шляхом врахування генетичних особливостей формування річкового стоку в протягом періоду дослідження. Тобто вона забезпечується врахуванням особливостей багаторічної динаміки водного стоку. Особлива увага приділяється включенню в розрахункову вибірку даних однакової кількості маловодних і багатоводних періодів, тобто калібрувальний період повинен враховувати циклічно-фазову структуру гідрологічних рядів.

У даній роботі за калібрувальний було обрано період з 1981 по 2010 рр., який використаний кліматологами у європейському проекті “IMPRESSIONS” як базовий період для моделювання клімату Європи на XXI століття [20]. Слід відмітити, що цей 30-річний період дозволяє сформувати репрезентативні статистичні вибірки необхідних метеорологічних і гідрологічних параметрів, однак циклічно-фазову структуру гідрологічних рядів не враховує. Це може вносити певні похибки у точність розрахунку параметрів моделі та у результати майбутнього прогнозу.

Валідація моделі – це перевірка здатності моделі прогнозувати в межах необхідної точності [15].

Валідація включає в себе запуск моделі з використанням параметрів, які були визначені (відкориговані) в процесі калібрування і порівняння прогностичних результатів з даними спостереження, що не використовуються під час процесу калібрування.

Для валідації моделі нами було використано багаторічні періоди спостережень (за весь наявний період спостережень) за основними гідрологічними і метеорологічними параметрами.

Валідація моделі здійснювалась для усіх досліджуваних річок. Суть процедури полягала у використанні калібрувальних параметрів моделі, встановлених на основі спостережень за базовий кліматичний період 1981 – 2010 рр. при складанні так званого ретроспективного прогнозу від початку спостережень у тому чи іншому річковому басейні і до наших днів.

Отже, перш ніж приступити до моделювання змін водності усіх річок досліджуваного регіону, було виконано комплекс калібрувально-валідаційних розрахунків.

Для калібрування гідрологічної моделі використовувалися дані щоденних спостережень за водним стоком, а також інші доступні гідрологічні та кліматичні дані. Калібрування полягало в налаштуванні параметрів моделі таким чином, щоб змодельовані значення водного стоку максимально відповідали фактичним спостереженням.

Для оцінки якості калібрування застосовувалися такі статистичні критерії:

- **NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency)** – коефіцієнт ефективності Неша-Саткліффа, який визначає, наскільки добре змодельовані значення відповідають спостереженням.

$$\frac{\sum_{t=1}^N (Q_{s,t} - Q_{o,t})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{o,t} - \bar{Q}_o)^2}$$

Де  $Q_{s,t}$  та  $Q_{o,t}$  –  $t$ -ті симуляції та спостереження для оцінюваного компонента;

- **Pbias (Percent Bias)** – відсоткове відхилення змодельованих даних від реальних спостережень, що вказує на систематичну переоцінку або недооцінку водного стоку моделлю.

$$\frac{\sum_{t=1}^N (Q_{s,t} - Q_{o,t})}{\sum_{t=1}^N Q_{o,t}} * 100$$

Де  $Q_{s,t}$  та  $Q_{o,t}$  –  $t$ -ті симуляції та спостереження для оцінюваного компонента;

- **RMSE (Root Mean Square Error)** – корінь середньоквадратичної помилки, що демонструє середнє відхилення змодельованих значень від спостережених.

$$RMSE = \sqrt{[(\sum(P_i - O_i)^2) / n]}$$

Де  $P_i$  - прогнозоване значення,  $O_i$  - спостережене значення, а  $n$  - загальна кількість спостережень або точок даних

Результати калібрування наведені в табл. 3.1, де подано детальний порівняльний аналіз між змодельованими та фактичними значеннями стоку для кожного з досліджуваних річкових басейнів.

Крім того, графічне представлення результатів калібрування подано на рис. 3.1. Ці візуалізації допомагають краще проаналізувати ефективність налаштованої моделі та визначити можливі напрямки її подальшого вдосконалення.

Таблиця 3.1 - Оцінка якості калібрування гідрологічної моделі

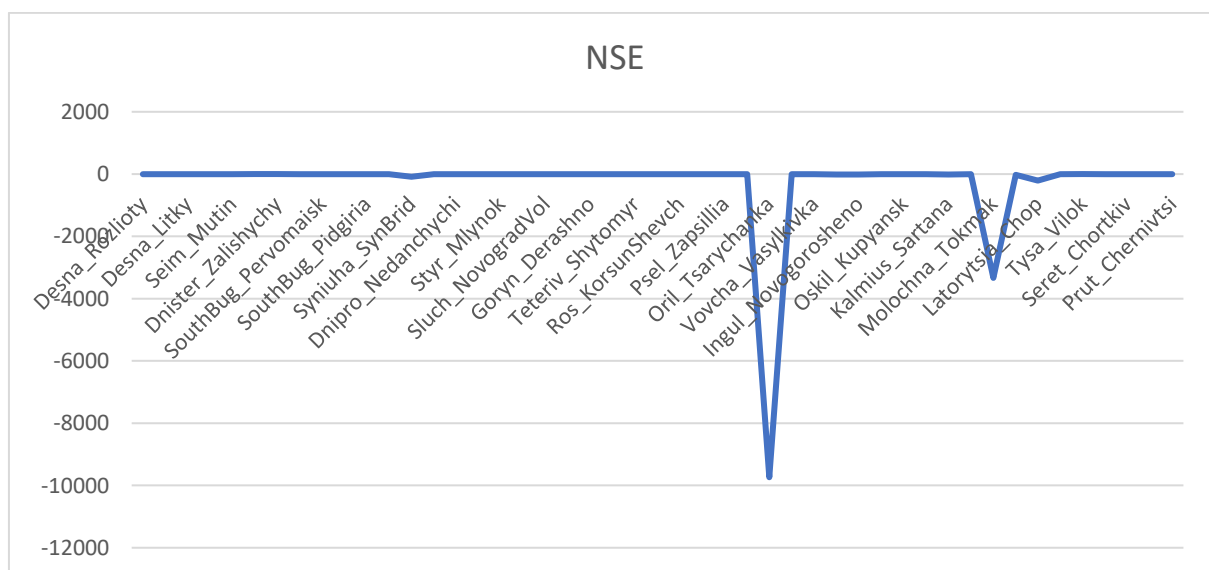
Річка_пост	NSE	Pbias	KGE
Десна_Розльоти	0.5	-2.7	0.5
Десна_Чернігів	0.5	21	0.7
Десна_Літки	0.2	21.2	0.6
Снов_Носівка	0.1	43.5	0.4
Сейм_Мутин	0.1	55.7	0.3
Дністер_Галич	0.6	-8.6	0.6
Дністер_Заліщики	0.6	-2.8	0.7
Дністер_Мог. Под.	0.4	-0.6	0.5
Півд. Буг_Первомайськ	-1.2	40.1	0
Півд Буг_Олександрівка	-0.1	0	0.2
Півд. Буг_Підгір'я	-4.2	74.3	-0.7
Півд. Буг_Тростянчик	-0.2	-1.4	0.4
Синюха_Син. Брід	-86.9	592.8	-7.5
Вел. Вис_Ямпіль	-5.3	167.9	-1.2
Дніпро_Nedanchychi	0.5	21	0.7
Стир_Луцьк	-3.4	54.1	-0.5
Стир_Млинок	0	20.8	0.4
Случ_Сарни	0.4	44.9	0.5
Случ_Новоград. Вол	-4.8	176.7	-1.2
Стохід_Любешів	0.3	-48.3	0.3
Горинь_Деражно	-2.6	67.7	-0.3
Горинь_Ощенін	-1.3	39.1	0
Тетерів_Житомир	-1.9	139.8	-0.7
Тетерів_Іванків	-1.5	107.1	-0.3
Рось_Корсунь Шев.	-0.9	39.5	0.2
Сула_Лубни	0.3	8.9	0.6
Псел_Запсілля	0.2	17.8	0.3
Ворскла_Кобеляки	-0.5	63.3	0.1

Оріль_Царичанка	-9736	15651	-160.9
Самара_Кочережки	-2.7	191.6	-1.1
Вовча_Василівка	0.3	-3.6	0.4
Інгулець_Кривий Ріг	-15.8	475.9	-4.4
Інгул_Новогорошено	-11.6	319.6	-3
Сів.Донець_Крушилівка	-0.6	36.6	0.3
Оскіл_Куп`янськ	0.4	-7.9	0.6
Лугань_Луганськ	0	-42.4	0.4
Кальміус_Сартана	-15.3	93.1	-2.2
Айдар_Новоселівка	0.3	10.5	0.6
Молочна_Токмак	-3330.1	2150.9	-48.1
Уда_Безлюдівка	-22.9	206.8	-2.8
Латориця_Чоп	-210.7	1102.4	-11.7
Уж_Ужгород	0.3	47.7	0.5
Тисв_Вилок	0.6	18.2	0.7
Стрий_В. Синьовидне	-0.1	53.9	0.4
Серет_Чортків	-5.9	43.1	-0.7
Зах. Буг_Літовеш	-2.2	91.6	-0.3
Прут_Чернівці	-0.3	69.7	0.3

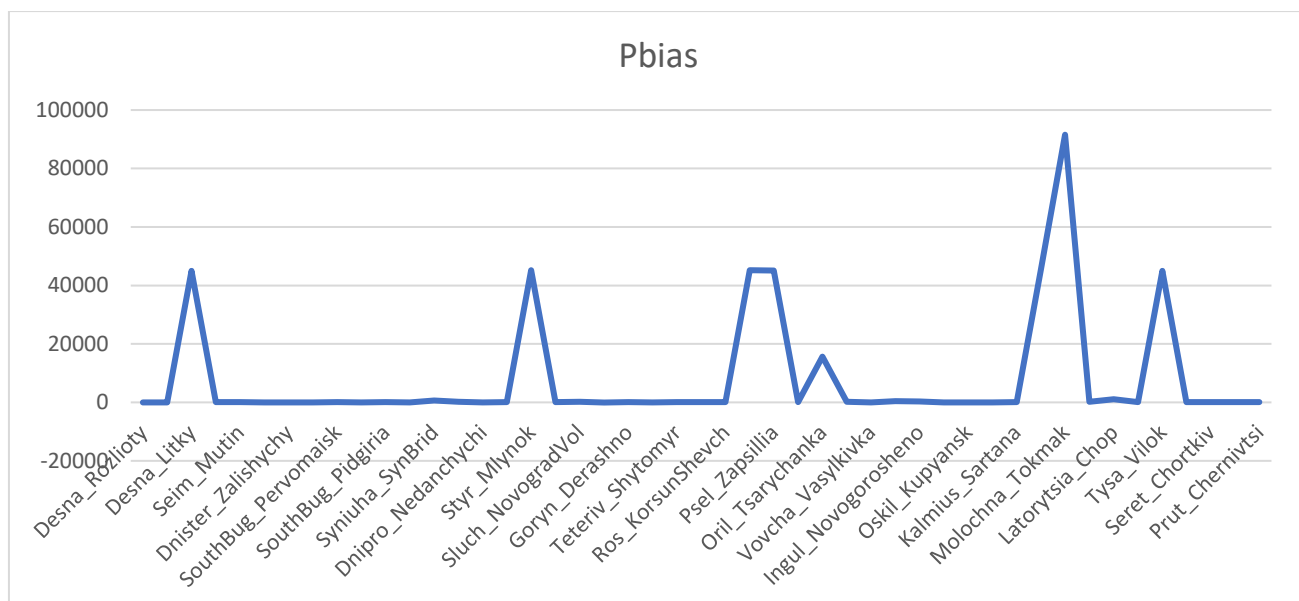
Дані вказують, що для деяких річкових басейнів (наприклад, Тиса-Вилок, Дністер-Галич, Десна-Розльоти) модель показала задовільні результати калібрування ( $NSE > 0.5$ , PBIAS у допустимих межах). Однак для деяких річок (наприклад, Оріль-Царичанка, Синюха-Синій Брід, Латориця-Чоп) модель має значні похибки, що вказує на необхідність подальшої оптимізації параметрів.

Графічне представлення результатів калібрування подано на рис. 3.2, що дозволяє детальніше проаналізувати відхилення змодельованих значень від фактичних і оцінити можливості подальшого покращення моделі.

### A)NSE



## b) PBIAS



## c) KGE

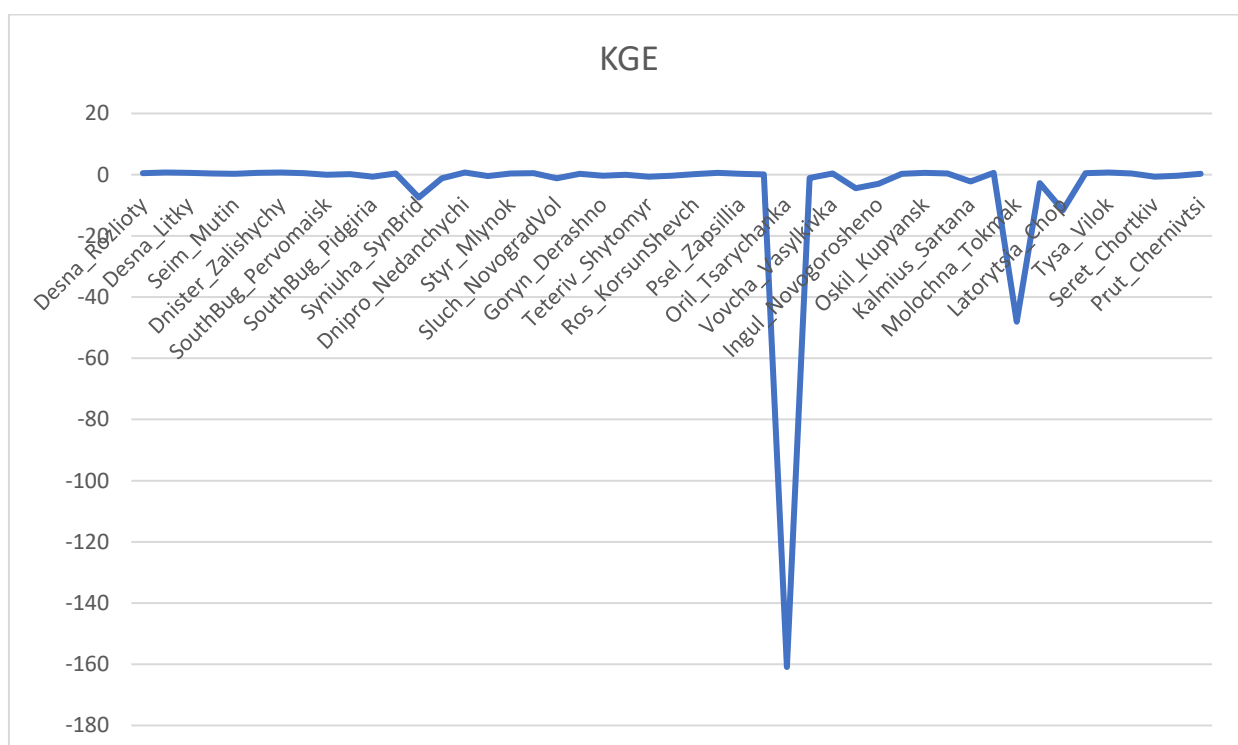


Рис.3.2 - Оцінка якості калібрування гідрологічної моделі

Результати калібрування параметрів моделі за даними базового кліматичного періоду (1981 – 2010 рр.) наведено в табл. 3.1 та і, як приклади, на рис. 3.2.

Симуляція водного стоку виконувалася для двох прогностичних періодів:

- Середньостроковий період: 2021-2050 рр.
- Довгостроковий період: 2051-2079 рр.

Використані загальноциркуляційні кліматичні моделі (GCMs) є частиною останнього шостого покоління проєкту CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) і включають:

- gfdl-esm4 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)
- ipsl-cm6a-lr (Institut Pierre Simon Laplace)
- mpi-esm1-2-hr (Max Planck Institute)
- mri-esm2-0 (Meteorological Research Institute)
- ukesm1-0-ll (UK Earth System Model)

Для кожної з моделей було застосовано два сценарії зміни клімату, засновані на соціально-економічних шляхах розвитку (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs):

- SSP1-2.6 – сценарій помірної зміни клімату, що передбачає зменшення викидів парникових газів і перехід до стійких джерел енергії.
- SSP5-8.5 – сценарій значного потепління, що ґрунтується на активному використанні викопного палива та мінімальних заходах щодо обмеження викидів.

Усі проєкції водного стоку були отримані на основі аналізу даних з проєкту ISMIP3b [19]. Це наступна ітерація, що базується на прогнозах CMIP6.

Результати калібрування моделі представлені на рис.3.3. Для калібрування використано період з 1960 р. по 2020 р. Дані щоденних витрат води за цей період по 49 гідрологічних створах України були використані для процесу «підгонки» моделі до реальних даних. Результати моделювання, як видно з

оцінок точності калібрування (табл.3.1) та рис. 3.3 можуть бути задовільними лише у 30% вибраних для дослідження річок. Тобто у 18 випадках з 49. Цей результат все ж можна визнати як позитивний, адже якість процесу моделювання залежить від дуже багатьох причин, починаючи від якості вихідних метеорологічних і гідрологічних даних, якості підбору моделей, результатів калібрування та валідації, тощо.

З цих 18 випадків вибрано 12 в якості репрезентативних басейнів для різних регіонів України та проведено симуляцію (моделювання) водного стоку на період до 2079 р.

Висновок до розділу 3.

Таким чином в даному розділі представлено результати з оцінки якості калібрування гідрологічної моделі з використанням наступних статистичних критеріїв: NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) – коефіцієнт ефективності Неша-Саткліффа, Pbias (Percent Bias) – відсоткове відхилення змодельованих даних від реальних спостережень, RMSE (Root Mean Square Error) – корінь середньоквадратичної помилки, що демонструє середнє відхилення змодельованих значень від спостережених. Усі критерії показали у більшості випадків доволі схожі результати, що свідчить про їх ефективність. Результати калібрування було візуалізовано у вигляді синхронних графіків змодельованого і фактичного водного стоку за період з 1960 р. по 2020 р. За цими даними було відібрано репрезентативні річкові басейни для проведення моделювання водного стоку на найближчу та віддалену перспективу.

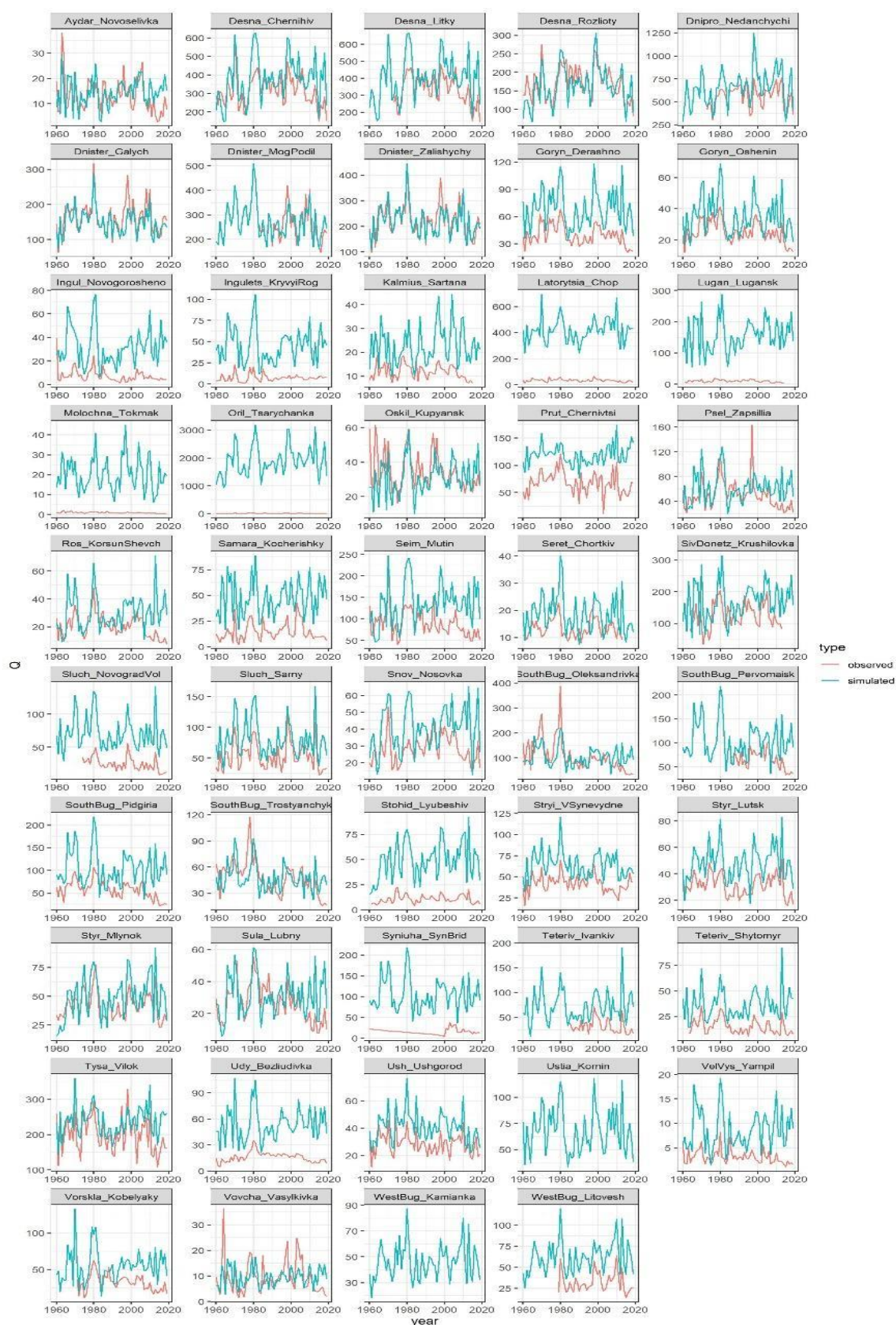


Рис.3.3 - Результати калібрування моделі WaterGAP2-2e за даними інструментальних спостережень за водним стоком на 49 річках України за період 1960-2020 рр.

## РОЗДІЛ 4

### ОЦІНКА МОЖЛИВОГО ВПЛИВУ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА ВОДНИЙ СТІК РІЧОК УКРАЇНИ

Зміна клімату вже сьогодні чинить відчутний вплив на гідрологічні процеси в Україні, зокрема на об'єми та сезонний розподіл водного стоку річок. У зв'язку з потеплінням, зростанням температури повітря, зміною режиму опадів та збільшенням частоти екстремальних погодних явищ, гідрологічні умови в басейнах річок України зазнають суттєвих трансформацій. З огляду на просторову різноманітність природно-кліматичних умов країни, реакція річкових систем на кліматичні зміни є різною в окремих регіонах.

З метою виявлення характеру та масштабів цих змін було здійснено регіональний аналіз впливу кліматичних факторів на водний стік основних річкових басейнів України у середньостроковій (2021–2050 рр.) та довгостроковій (2051–2079 рр.) перспективі відповідно до сценаріїв SSP1\_2.6 та SSP5\_8.5. У ході аналізу особливу увагу приділено зміні середнього річного стоку, сезонному перерозподілу стоку, загрозам повеней, паводків і періодів водного дефіциту.

Нижче наведено результати оцінки для кожного із регіонів — Північного, Центрального, Південного, Східного, Західного з урахуванням природних особливостей території, структури водогосподарського комплексу та ймовірних ризиків для екосистем і населення.

Результати моделювання водного стоку представлені у вигляді графіків зміни внутрішньорічного розподілу річкового стоку (% від стоку за контрольний період) у всіх річкових басейнах України у двох майбутніх періодах 2021-2050 (середньострокова перспектива) та 2051-2079 (довгострокова перспектива) згідно з SSP1-2.6 та SSP5-8.5

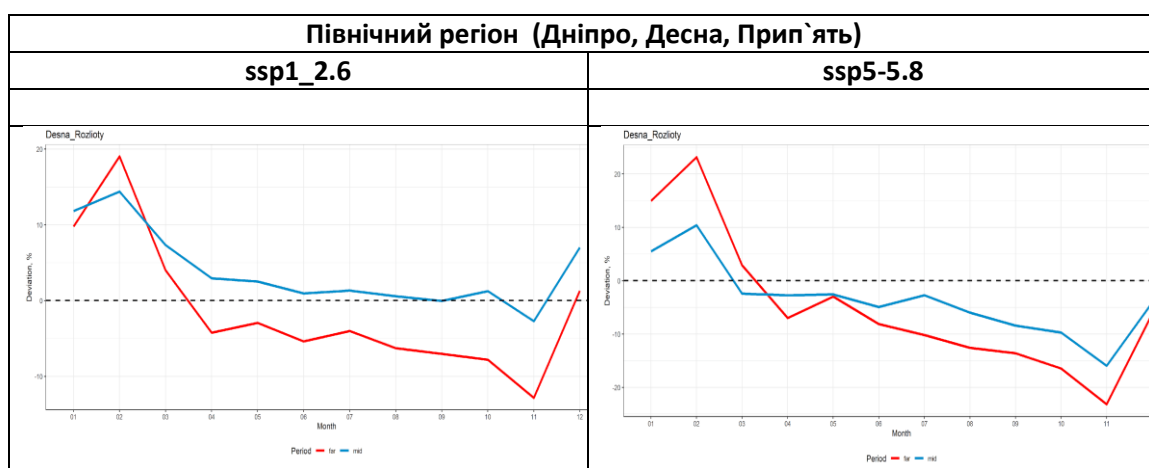
**Північний регіон.** Згідно з отриманими розрахунками, водний стік річок Північного регіону (басейни Десни, Прип'яті та Верхнього Дніпра) у найближчому майбутньому (до 2050 року) істотно не зміниться. За обома

сценаріями кліматичних змін зменшення стоку в окремі місяці не перевищуватиме 10%, що повністю відповідає межам природних короткострокових коливань водного режиму річок. Таке зменшення не призведе до критичної ситуації у водному секторі регіону.

Водночас, очікується збільшення зимового стоку — на 10–15% порівняно з базовим періодом. Це зумовлено істотним потеплінням у регіоні, яке вже було зафіксоване в попередніх кліматичних дослідженнях, зокрема в рамках вивчення впливу клімату на формування паводків.

Особливу загрозу становить збільшення водного стоку в лютому до 20%, що може призвести до формування стійких весняних паводків. Це, своєю чергою, може спричинити значні збитки для регіону, зокрема: руйнування берегів річок і прибережної інфраструктури, тривале затоплення об'єктів інженерної інфраструктури та їх пошкодження. Додатковим фактором ризику є можливе розмиття радіоактивного забруднення на затоплених територіях поблизу 30-кілометрової зони Чорнобильської АЕС.

У довгостроковій перспективі (2051–2079 роки) подальше потепління клімату зумовить подальше зростання зимового стоку. Максимум весняної повені зміститься з традиційного березня на лютий. В інші пори року відбудеться зменшення водного стоку, яке буде найбільш помітним в осінній період: до 10–12% за сценарієм *ssp1\_2.6* та до 18–20% за сценарієм *ssp5\_5.8* (див. рис. 4.1).



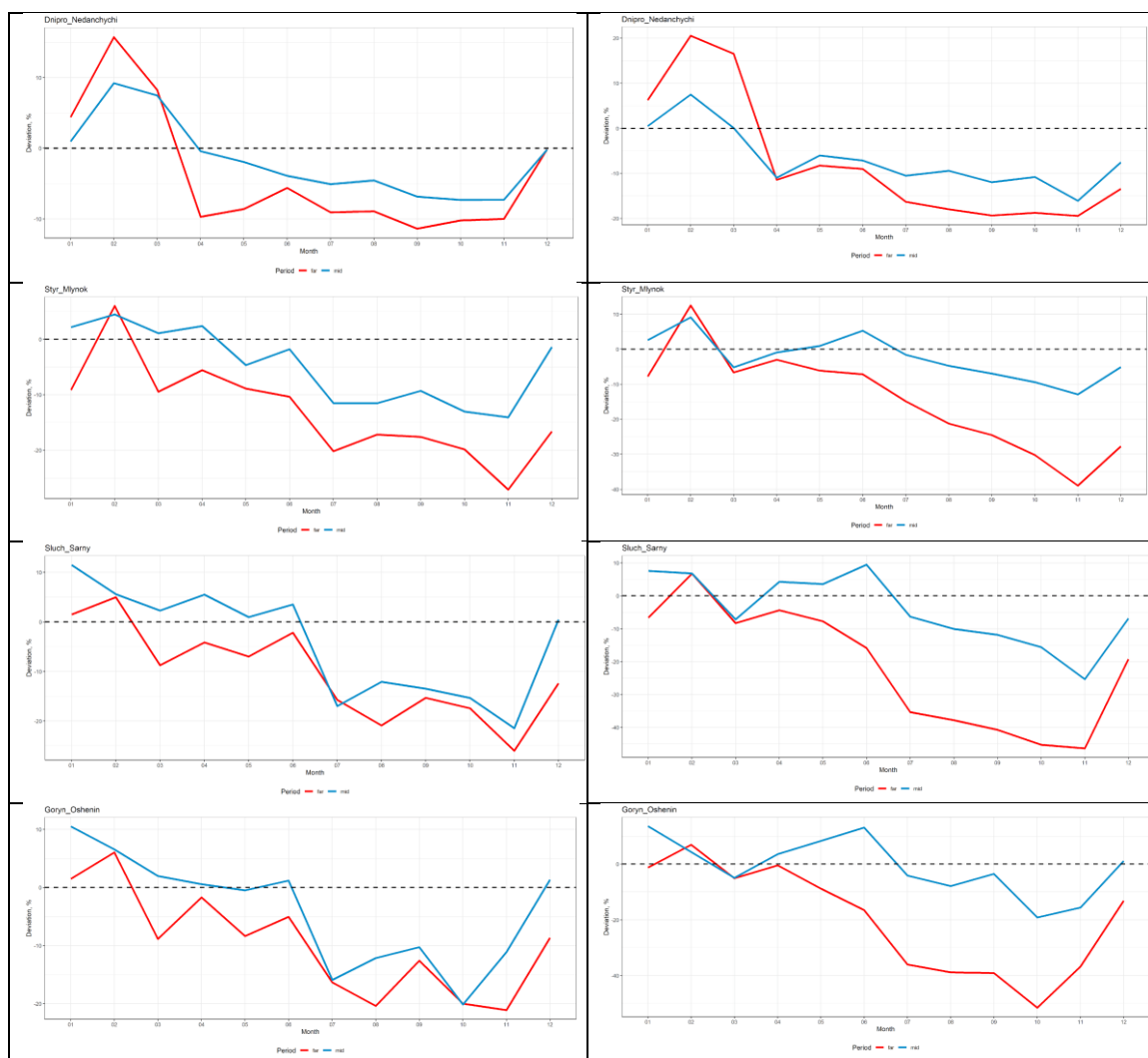


Рис.4.1 - Зміна внутрішньорічного розподілу річкового стоку (% від стоку базового періоду) для річок Північного регіону України ( середня перспектива, 2021-2050, синя лінія) відповідно до SSP1-2.6 та SSP5-8.5

У середньостроковій перспективі водний стік річок Центрального регіону (басейн Середнього Дніпра) істотно зросте в зимовий період — на 10–20%. Максимум весняної повені очікується в лютому, а подекуди навіть у січні, замість традиційного березня. Основною причиною таких змін є подальше потепління клімату, що проявлятиметься у вигляді зимових відлиг різної тривалості, а також збільшенням запасів снігу, що живлять річки в цей період.

Починаючи з травня і до листопада, водність річок буде нижчою від норми базового періоду, проте це зменшення буде незначним і не становитиме суттєвої загрози для функціонування водного господарства регіону. Обидва

сценарії кліматичних змін демонструють подібні результати, що свідчить про стійку тенденцію до сезонного перерозподілу стоку.

У довгостроковій перспективі (2051–2079 роки) також прогнозується зростання стоку в зимові місяці та зниження водності з травня по листопад. За різними місяцями зменшення коливатиметься в межах від 2 до 20% (див. рис. 4.2).

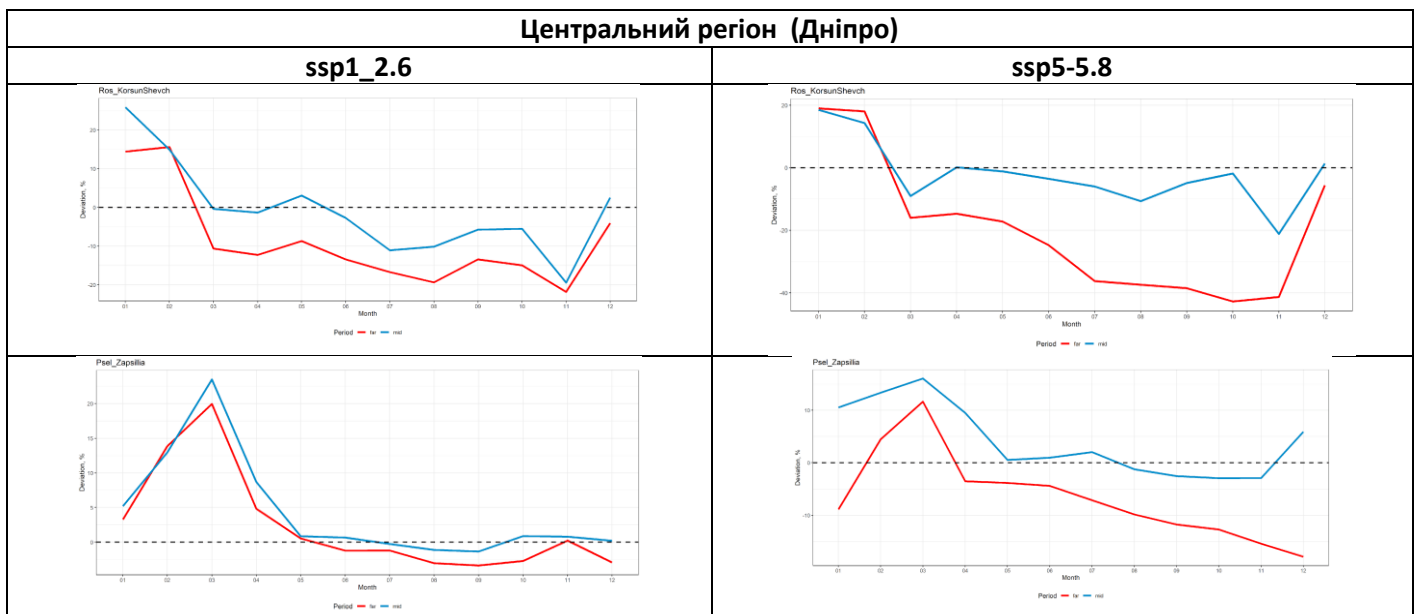


Рисунок 4.2 - Зміна внутрішньорічного розподілу річкового стоку (% від стоку базового періоду) для річок Центрального регіону України ( середня перспектива, 2021-2050, синя лінія) відповідно до SSP1-2.6 та SSP5-8.5

**Південний регіон.** У період 2021–2050 років річки Південного регіону (басейни Нижнього Дніпра та Південного Бугу) зберігатимуть подібний внутрішньорічний розподіл стоку, що й у базовому періоді. Найбільша частка річкового стоку припадатиме на зимовий період. Зокрема, в басейні Південного Бугу, внаслідок потепління та частих відлиг, максимум річного стоку спостерігатиметься вже в січні, що раніше не було характерним для цього регіону.

У весняно-осінній період очікується зниження водності річок. Проте, на середніх річках басейну Дніпра (наприклад, річка Вовча), протягом зазначеного

періоду суттєвого зменшення стоку не прогнозується порівняно з контрольним періодом 1986–2015 років. Очікуються лише незначні відхилення, які знаходяться в межах природних коливань стоку. Водночас, у басейні Південного Бугу з червня по листопад прогнозується зниження водності на 15–20%. Це особливо позначиться на водокористувачах Миколаївської області, які залежать від місцевого поверхневого стоку.

У довгостроковій перспективі (2051–2079 роки) на річках Південного регіону очікується помітне збільшення стоку у весняний період — на 10–25%, залежно від конкретної річки. Згідно зі сценарієм *ssp1\_2.6*, внутрішньорічний розподіл стоку істотно не зміниться. Однак за умов реалізації сценарію *ssp5\_5.8* може відбутися значне зменшення стоку з березня по листопад.

Особливо критичним може стати період із червня по листопад, коли водність може знизитися на 40–45% порівняно з базовим періодом. У таких умовах формуватиметься дефіцит водних ресурсів, що:

- погіршить водопостачання міст і сіл регіону;
- обмежить розвиток аграрного сектору;
- негативно позначиться на санітарно-гігієнічному стані рекреаційних зон Чорноморського узбережжя.

Особливо загрозовою ситуація є для комунального та промислового водопостачання міста Одеса. Найбільший дефіцит води прогнозується в Арцизькому, Татарбунарському, Кілійському районах Одеської області, де відсутні власні джерела прісної води.

У Херсонській області очікується інтенсивніше використання підземних водних горизонтів, що вимагає невідкладних заходів для запобігання їх забрудненню (див. рис. 4.3).

Південний регіон (Нижній Дніпро)	
<i>ssp1_2.6</i>	<i>ssp5-5.8</i>

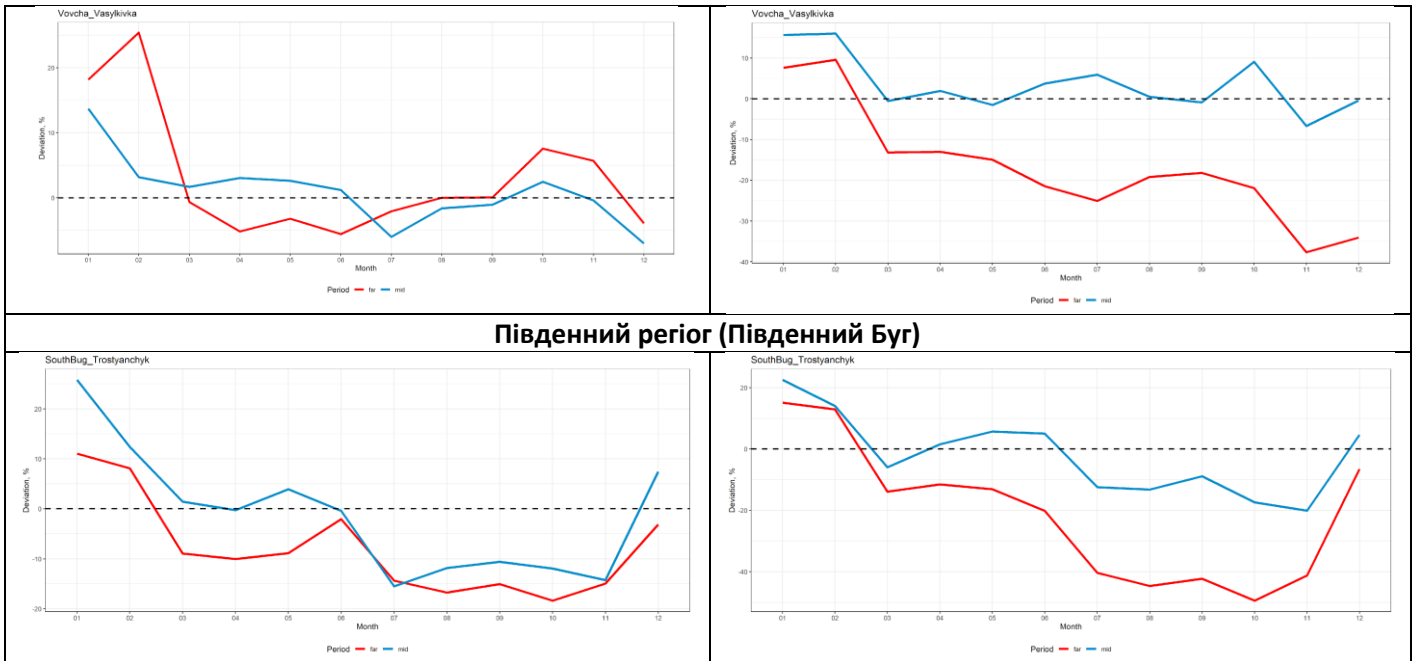


Рис 4.3 - Зміна внутрішньорічного розподілу річкового стоку (% від стоку базового періоду) для річок Південного регіону України (середня перспектива, 2021-2050, синя лінія) відповідно до SSP1-2.6 та SSP5-8.5

У січні–березні у Східному регіоні очікується збільшення стоку, причому максимальне щорічне значення стоку може значно зрости:

- за сценарієм ssp1\_2.6 — на 20%,
- за сценарієм ssp5\_5.8 — до 40%.

До 2050 року в інші місяці року суттєвих змін у схемі розподілу стоку не передбачається, незалежно від сценарію розвитку клімату.

Однак у період 2051–2079 років прогнозується зниження водності з квітня по грудень у порівнянні з контрольним періодом 1986–2015 років (див. рис. 4.4).

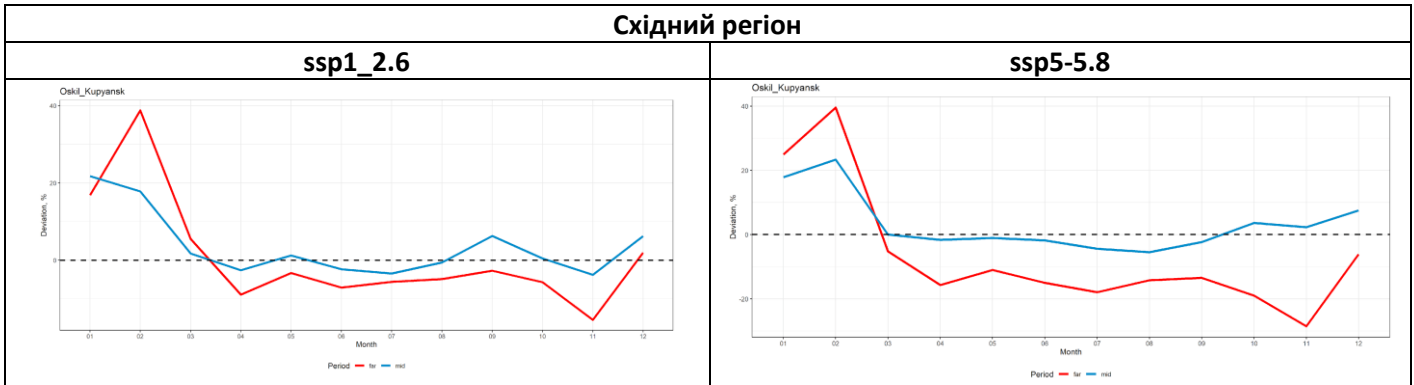


Рис 4.4 - Зміна внутрішньорічного розподілу річкового стоку (% від стоку базового періоду) для річок Східного регіону України ( середня перспектива, 2021-2050, синя лінія) відповідно до SSP1-2.6 та SSP5-8.5

**Західний регіон.** Цей регіон представлений рівнинними та гірськими річками. Водний стік рівнинних річок у зимовий період (січень–лютий) дещо зростає — не більше ніж на 10%, проте в інші місяці року очікується його істотне зменшення. У літньо-осінній сезон прогнозується зниження стоку до  $-40\%$ , що створює загрозу водного дефіциту для населення та економіки регіону. Така ситуація призведе до формування нестачі водних ресурсів у сільських громадах Львівської та Волинської областей.

Гірські річки характеризуються складним характером внутрішньорічного розподілу стоку. На річках Закарпаття (Тиса) у період з грудня по березень очікується збільшення стоку на  $25\text{--}30\%$ . Значне зростання об'ємів стоку в цей період року сприятиме формуванню катастрофічних паводків на гірських річках, що може призвести до значних економічних збитків у всіх секторах господарства, а також у сільських громадах Закарпатської області.

У період з квітня по листопад очікується зниження стоку на  $10\text{--}25\%$  у порівнянні з кліматичною нормою. На прикарпатських річках (Серет) у зимові місяці передбачається збільшення стоку на  $10\text{--}20\%$ , а в умовах сценарію SSP5\_5.8 — також у травні–червні у віддаленій перспективі (2051–2079 рр.). В

інші місяці року в обох періодах (2021–2050 та 2051–2079 рр.) прогнозується зменшення водного стоку порівняно з базовим періодом.

Найкритичніша ситуація для водогосподарського комплексу очікується з червня по листопад, коли водний стік може зменшитися на 20–40% (рис. 4.5).

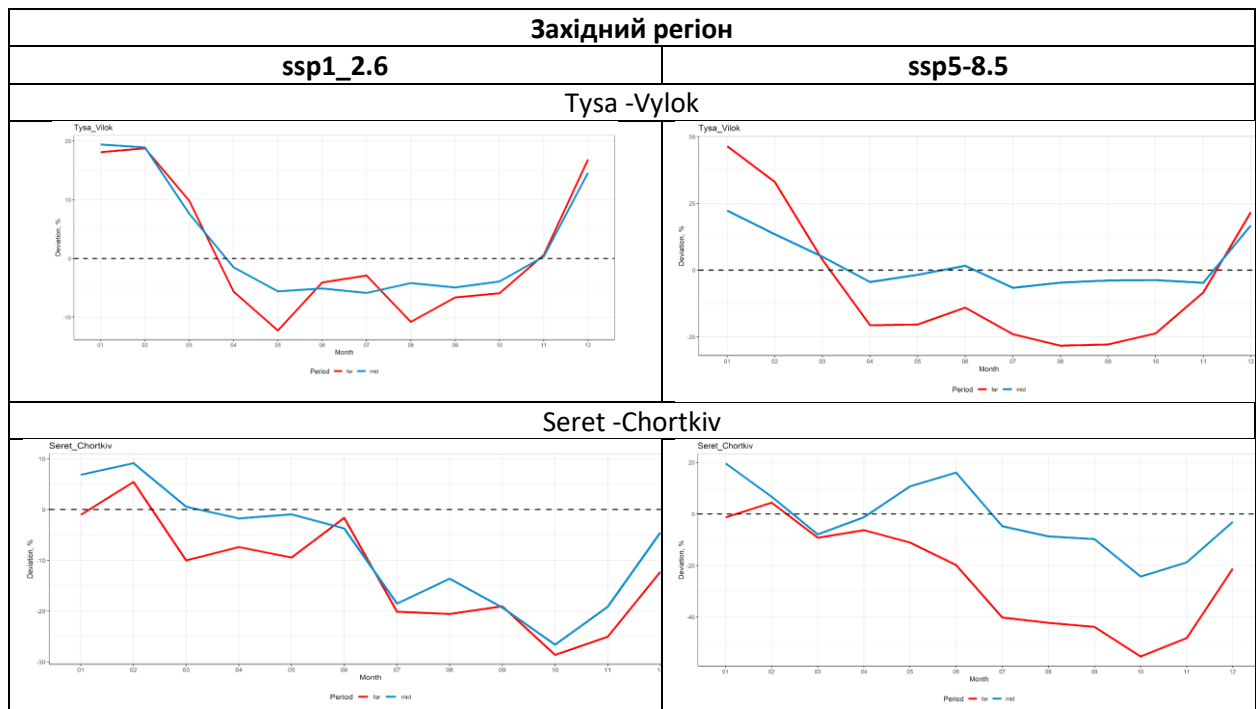


Рис 4.5 - Зміна внутрішньорічного розподілу річкового стоку (% від стоку базового періоду) для річок Західного регіону України (середня перспектива, 2021-2050, синя лінія) відповідно до SSP1-2.6 та SSP5-8.5

#### Висновки до розділу 4.

1. Змодельовано зміни середньорічного стоку річок України у середньостроковій (2021–2050) та віддаленій перспективі (2051–2079). Було встановлено, що в середньому майбутньому можливе незначне зростання середньорічного стоку на 5–7%. У віддаленому майбутньому прогнозується зменшення водності на 4–14% у залежності від сценарію. Найбільше скорочення очікується у південному регіоні, де ситуація може набути кризового характеру через поєднання кліматичних та антропогенних факторів.

2. Згідно з результатами моделювання, в усіх регіонах України простежується стійка тенденція до збільшення зимового стоку (до 30–40%) та зменшення літньо-осіннього (до 40%). Це свідчить про ймовірність зростання ризику зимових паводків та водного дефіциту влітку. Такі зміни створюють серйозні виклики для систем водопостачання, енергетики, сільського господарства та екологічного балансу річкових екосистем.

3. Моделювання водного стоку річок України на періоди 2025–2050 та 2051–2079 років є ключовим для розуміння впливу зміни клімату на гідрологічні процеси. Різні регіони країни демонструють специфічні тенденції змін водного режиму, що обумовлено географічними, кліматичними та гідрологічними особливостями.

## ВИСНОВКИ

1. Глобальні кліматичні зміни, зокрема потепління, зміна режиму опадів, зростання частоти екстремальних погодних явищ, вже мають суттєвий вплив на водний стік річок у різних регіонах світу, включаючи Україну. Зростає роль гідрологічного моделювання для прогнозування майбутніх змін у водному балансі.

2. Встановлено, що основними чинниками, які визначають динаміку річкового стоку, є температура повітря, кількість та режим опадів, а також випаровуваність. За умов потепління змінюється співвідношення між складовими водного балансу, зокрема відбувається зменшення снігового запасу, прискорення танення снігу, а отже, зміщення весняного водопілля та посилення літніх посух.

3. Розглянуто особливості гідрологічного моделювання як основного інструменту прогнозування змін річкового стоку під впливом зміни клімату. Обрано модель WaterGAP, яка широко використовується в міжнародних дослідженнях і дозволяє оцінити зміну водних ресурсів у різних сценаріях соціально-економічного розвитку та кліматичних умов. Модель враховує особливості рельєфу, ґрунтів, землекористування та клімату.

4. Обґрунтовано використання кліматичних проєкцій, зокрема SSP1-RCP2.6 як оптимістичного сценарію з низьким рівнем викидів, та SSP5-RCP8.5 – як песимістичного сценарію з високими викидами. Проведено корекцію кліматичних даних для зменшення похибок моделювання. Такий підхід дозволяє оцінити потенційний спектр змін у гідрологічних умовах України за різного ходу глобального потепління.

5. Здійснено вибір річкових басейнів, які репрезентують різні фізико-географічні умови країни, зокрема басейни північного, центрального, західного, східного та південного регіонів. Проведено підготовку вхідних гідрологічних даних, їх аналіз та калібрування гідрологічної моделі для

підвищення точності прогнозів. Ці дії дозволили налаштувати модель до реальних умов функціонування водозбірних басейнів в Україні.

6. Результати калібрування моделі WaterGAP показали, що модель достатньо точно відтворює спостережувані значення стоку у значній кількості вибраних річкових басейнів. Це дозволяє з високим ступенем достовірності застосовувати її для прогнозування змін водного режиму у майбутньому. Встановлено, що модель найбільш надійно працює при використанні кліматичних проєкцій, скоригованих за статистичним зміщенням.

7. Змодельовано зміни середньорічного стоку річок України у середньостроковій (2021–2050) та віддаленій перспективі (2051–2079). Було встановлено, що в середньому майбутньому можливе незначне зростання середньорічного стоку на 5–7%. У віддаленому майбутньому прогнозується зменшення водності на 4–14% у залежності від сценарію. Найбільше скорочення очікується у південному регіоні, де ситуація може набути кризового характеру через поєднання кліматичних та антропогенних факторів.

8. Згідно з результатами моделювання, в усіх регіонах України простежується стійка тенденція до збільшення зимового стоку (до 30–40%) та зменшення літньо-осіннього (до 40%). Це свідчить про ймовірність зростання ризику зимових паводків та водного дефіциту влітку. Такі зміни створюють серйозні виклики для систем водопостачання, енергетики, сільського господарства та екологічного балансу річкових екосистем.

9. Зміна клімату матиме суттєвий і регіонально диференційований вплив на водний стік річок України. Використання сучасних моделей та кліматичних проєкцій дозволяє не лише прогнозувати потенційні зміни, але й розробляти адаптивні механізми управління водними ресурсами. Виявлені тенденції – зростання зимового стоку, зменшення літньої водності, ризику дефіциту води – потребують негайного реагування з боку державної політики та водогосподарських організацій. Для забезпечення сталого водокористування необхідно надалі поглиблювати дослідження на регіональному рівні з урахуванням локальних природних і соціально-економічних умов.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Гідрологічні аспекти зміни клімату. URL: Hydrological aspects of climate change. [https://bookdown.org/hr\\_kanlei/Kurse\\_Notitzen/FRM1.html](https://bookdown.org/hr_kanlei/Kurse_Notitzen/FRM1.html)
3. 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.
4. Європейський центр середньострокових прогнозів погоди. URL: <https://www.ecmwf.int/>
5. Національна геологічна служба США. URL: <https://www.usgs.gov/>
6. Осадчий В.І., Бабіченко В.М. Динаміка стихійних метеорологічних явищ в Україні. *Укр. геогр. журн.* 2012. №4. С.8-14.
7. 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.
8. Сніжко С. І. Теорія і методи аналізу регіональних гідрохімічних систем : монографія. – К. : Ніка-Центр, 2006. – 284 с.
9. Університет Східної Англії. Відділ кліматичних досліджень. URL: <https://www.uea.ac.uk/groups-and-centres/climatic-research-unit>
10. Шевченко О., Власюк О. Оцінка вразливості та заходи з адаптації до зміни клімату: Одеса, 2015. Національний екологічний центр України. URL: [http://necu.org.ua/wp-content/uploads/ad\\_Odesa\\_City\\_A4.pdf](http://necu.org.ua/wp-content/uploads/ad_Odesa_City_A4.pdf).
11. Яцик А.В., Грищенко Ю.М., Волкова Л.А., Пашенюк І.А. Водні ресурси: Використання, охорона, відтворення, управління: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. Київ.: Генеза, 2007. 360 с.

12. Didovets I, Krysanova V, Snizhko S, Bronstert A. (2019) Assessment of climate change impact on floods in the Upper Prut and Tisza River catchments (Ukraine). EGU General Assembly Conference Abstracts 19, 16355
13. Didovets I., Bronstert A., Snizhko S., Balabukh V., Krysanova V. (2019) Climate change impact on regional floods in the Carpathian region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.01.002.
14. Didovets I., Lobanova N., Snizhko S., Bronstert A., Krysanova V. (2017): Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Three Representative Ukrainian Catchments Using Eco-Hydrological Modelling. *Water*. – 2017. -18 P.
15. Didovets I., Snizhko S., Bronstert A., Lobanova A., Krysanova V.(2017): Eco-hydrological modelling of river water flow under climate change impact using numerical model SWIM. //Proceedings of the 1. Ukrainian hydrometeorological congress. Odesa: TEC. – P.130-131.
16. Dooge J. C. I. Hydrologic models and climate change / J. C. Dooge // *Journal of Geophysical Research*. – 1992.– V. 97, № 7. – P. 2677-2686.
17. Feyen, L., Dankers, R., Bódis, K., Salamon, P., Barredo, J.I. (2012). *Fluvial flood risk in Europe in present and future climates*. *Climatic Change*, 112, 47–62. [DOI:10.1007/s10584-011-0339-7](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0339-7)
18. Grebin V., Didovets I., Obodovski O., Snizhko S. at al. (2020): *River Runoff in Ukraine Under Climate Change Conditions*. LAP Lambert Academic Publishing. 140P. ISBN: 978-620-2-67675-5
19. [https://www.isimip.org/documents/413/ISIMIP3b\\_bias\\_adjustment\\_factor\\_sheet\\_Gnsz7CO.pdf](https://www.isimip.org/documents/413/ISIMIP3b_bias_adjustment_factor_sheet_Gnsz7CO.pdf)
20. IMPRESSIONS – Impacts and Risks from High-End Scenarios: Strategies for Innovative Solutions. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.impressions-project.eu>.
21. Intergovernmental Panel on Climate Change's Fourth Assessment Report (2007), Chapter 2, "Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing," pp. 133–134, 106 pp.

22. IPCC Sixth Assessment Report (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

23. Krysanova, V., Hattermann, F.F. (2017). Combining rainfall-runoff modelling and climate scenarios to assess climate change impact on water resources in Europe. *Climatic Change*, 123, 545–559. DOI:10.1007/s10584-013-0940-1

24. Lobanova, A., Hattermann, F. F., Koch, H., & Krysanova, V. (2020). Assessment of future climate and land use change impacts on the hydrology of the Vistula and Odra river basins. *Climate Research*, 81, 85–106. DOI:10.3354/cr01645

25. Minnesota Stormwater Manual. URL: [https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Stormwater\\_modeling,\\_models\\_and\\_calculators,\\_and\\_calculating\\_credits-combined](https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Stormwater_modeling,_models_and_calculators,_and_calculating_credits-combined)

26. Modelling: <https://hogback.atmos.colostate.edu/cmmmap/learn/modeling/whatIs2.html>

27. Müller Schmied, Hannes; Cáceres, Denise; Eisner, Stephanie; Flörke, Martina; Herbert, Claudia; Niemann, Christoph; Peiris, Thedini Asali; Popat, Eklavyya; Portmann, Felix Theodor; Reinecke, Robert; Schumacher, Maike (2021-02-23). "The global water resources and use model WaterGAP v2.2d: model description and evaluation". *Geoscientific Model Development*. 14 (2): 1037–1079.]

28. Obodovskiy O., Danko K., Snizhko S., Pochayevets O., Lukyanets O. (2020): Methodic Aspects of Hydroecological Assessment of Hydropower Potential of the Plain Rivers' (by Example of Dnieper Right-Bank Rivers). *Hydrobiological Journal* 56(4). P.84-102. DOI:10.1615/HydrobJ.v56. i4.70

29. Olsson J, Arheimer B, Borris M, Donnelly C, Foster K, Nikulin G, Persson M, Perttu A-M, Uvo CB, Viklander M, et al. Hydrological Climate Change Impact Assessment at Small and Large Scales: Key Messages from Recent Progress in Sweden. *Climate*. 2016; 4(3):39. <https://doi.org/10.3390/cli4030039>

30. Shevchenko O., Lee H., Snizhko S., Mayer H. (2013): Long-term analysis of heat waves in Ukraine. *International Journal of Climatology*. - DOI: 10.1002/joc.3792 Snizhko S., Kuprikov I., Shevchenko O. (2012): Assessment of

changes in rivers water flow in Ukraine on the basis of water-balance models. *Physical Geography and Geomorphology*, vol. 2(66). P. 157 -161.

31. Snizhko S., Kuprikov I., Shevchenko O., Pavelchuk E., Didovets Y. (2014): Use of water-balance Turk model and numerical regional model REMO for assessment of local water resources runoff in Ukraine in the XXI century. *The Bryansk State University Herald*. The Bryansk State University Herald, vol.4. – P. 191-200.

32. Snizhko S., Obodovskiy O., Shevchenko O. at al. (2020): Regional assessment changes of the river runoff of Ukrainian Carpathians region under climate changes. *Ukrainian Geographical Journal*. DOI: 10.15407/ugz2020.02.020

33. Snizhko S., Obodovsky O., Kuprikov I. (2017): Long-term forecast of water runoff of the Prut and Siret river basins. *Scientific Bulletin of Chernivtsi University*, issue 785, p. 27-33

34. Snizhko S., Pavelchuk E., Didovets Y. (2014): The study of time trends in water runoff and assess of their significance with Mann- Kendall test. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, vol. 2(33). P. 8-16.

35. Snizhko S., Shevchenko O., Didovets I. at al. (2019): Climate monitoring data application in the technological regional assessment scheme and simulation of water flow//Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. DOI: 10.3997/2214-4609.201903241

36. Snizhko S., Yatsuk M., Kuprikov I., Shevchenko O., Strutynska V., Krakovska S., Palamarchuk L., Shedemenko I. (2012): Evaluation of possible changes in local water runoff in Ukraine in the XXI century. *Water economy of Ukraine*. № 6 (102). P.8-16.

37. Snizhko, S.; Yazuk, M.; Kuprikov, I.; Shevchenko, O.; Strutinska, V.; Krakovska, S.; Palamarchuk, L.; Shedemenko, I. Assessment of possible water resources changes of local runoff in Ukraine in XXI century. *Water Econ. Ukr.* 2012, 6, 5–20.

38. Thober, S., Cuntz, M., Thonfeld, F. et al. (2020). Evaluation of simulated hydrological droughts in Europe: linking drought indicators to large-scale circulation

patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 4045–4062. DOI:10.5194/hess-24-4045-2020

39. 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

40. Snizhko S., Shevchenko O., Didovets I., Obodovskyi O., Pochaievets O. (2019). Climate monitoring data application in the technological regional assessment scheme and simulation of water flow. 5 p. DOI: 10.3997./2214-4609.201903241.