

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Географічний факультет
Кафедра гідрології та гідроекології

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІЧНОГО
СТОКУ ТА СКЛАДОВИХ ВОДНОГО БАЛАНСУ БАСЕЙНУ Р. ЗБРУЧ ЗА ДВА
КЛІМАТИЧНІ ПЕРІОДИ

Галузь знань: 10 – Природничі науки

Спеціальність: 103 – Науки про Землю

Освітньо-наукова програма «Гідрологія та інтегроване управління водних
ресурсів»

Виконав магістр 2-го року навчання

Пелех Дмитро Сергійович

Науковий керівник:

кандидат географічних наук

Гопцій Марина Володимирівна

Київ – 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1	
СПЕЦИФІКА БАСЕЙНУ Р. ЗБРУЧ ТА ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ РІЧКОВОГО СТОКУ	7
1.1 Географічне положення та гідрографічна мережа басейну р. Збруч	7
1.2 Рельєф, геологічна будова та ґрунтовий покрив як чинники стоку	9
1.3 Кліматичні особливості району дослідження	11
1.4 Антропогенне навантаження та водогосподарське використання ресурсів басейну	12
1.5 Роль р. Збруч у гідрологічній системі лівобережжя Середнього Дністра	14
РОЗДІЛ 2	
МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ВОДНИЙ БАЛАНС	16
2.1 Методи розрахунку основних гідрологічних характеристик річкового стоку	16
2.2 Методика визначення складових водного балансу басейну	19
2.3 Короткий аналіз сучасних кліматичних викликів та наслідків	23
РОЗДІЛ 3	
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГІДРОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТА СКЛАДОВИХ ВОДНОГО БАЛАНСУ В БАСЕЙНІ РІЧКИ ЗБРУЧ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН	27
3.1 Вихідна база гідрометеорологічних даних	27
3.2 Аналіз хронологічних графіків коливань річного стоку та оцінка водності річок за даними гідрологічних постів в басейні р. Збруч	28

3.3 Статистична оцінка часових рядів спостереження за стоком в басейні р. Збруч	33
3.4 Порівняльний аналіз зміни внутрішньорічного розподілу стоку в басейні р. Збруч за досліджуваний період	36
3.5 Оцінка динаміки метеорологічних складових водного балансу за досліджуваний період в басейні р. Збруч	40
3.6 Розрахунок водного балансу за місячні проміжки часу, сезони, теплий і холодний періоди року та за гідрологічний рік в басейні р. Збруч за два досліджувані періоди	43
ВИСНОВКИ	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

ВСТУП

Водні ресурси є одним із найважливіших чинників сталого розвитку суспільства, а їхня доступність у XXI столітті дедалі більше визначається характером і темпами кліматичних змін, під впливом яких відбувається інтенсивна трансформація регіональних гідрологічних циклів. Кваліфікаційну роботу присвячено порівняльному аналізу гідрологічних характеристик річного стоку та складових водного балансу басейну річки Збруч, який розташований у межах Подільської височини і виступає надзвичайно чутливим індикатором сучасних гідрокліматичних коливань. Дослідження базується на порівнянні двох послідовних тридцятирічних інтервалів — базового (1961–1990 рр.) та сучасного (1991–2020 рр.), і охоплює детальний кількісний розбір динаміки атмосферних опадів, річного стоку та сумарного випаровування, а також оцінку норми стоку та його мінливості при різних рівнях забезпеченості. Вибір цієї теми зумовлений тим, що зростання температури повітря безпосередньо змінює співвідношення між прихідними та витратними складовими водного балансу, провокуючи нівелювання класичного весняного водопілля та подовження маловодних меженних періодів. Отримані диференційовані оцінки змін елементів водного балансу в басейні Збруча мають вагому наукову та практичну значущість, оскільки вони виступають фундаментальною основою для стратегічного планування, сталого управління водними ресурсами та охорони вразливих екосистем регіону в нових кліматичних реаліях.

Метою роботи є на основі аналізу багаторічних гідрометеорологічних даних виконати порівняльну оцінку кількісних змін складових водного балансу та гідрологічних характеристик річного стоку басейну річки Збруч між двома кліматичними періодами для обґрунтування раціонального природокористування в умовах кліматичної трансформації.

Об'єкт дослідження — складові водного балансу (атмосферні опади, річковий стік, сумарне випаровування) та гідрологічні характеристики в межах басейну річки Збруч.

Предмет дослідження — часові закономірності та особливості просторового перерозподілу елементів водного балансу і річного стоку під впливом сучасних кліматичних змін.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі було реалізовано низку послідовних наукових завдань, що включали аналіз фізико-географічних та морфометричних особливостей формування стоку в басейні річки Збруч; формування та систематизацію репрезентативної бази гідрометеорологічних даних за загальний період 1961–2020 рр.; проведення гідролого-генетичного та статистичного аналізу багаторічних рядів річкового стоку за два розрахункові кліматичні періоди; оцінку динаміки головних кліматичних чинників, таких як температура повітря та режим опадів у межах водозбору; розрахунок величин сумарного випаровування за методом Константинова О.Р. із наступним визначенням і ув'язкою нев'язок водного балансу; а також детальний порівняльний аналіз трансформації внутрішньорічного розподілу стоку та елементів водного балансу за сезонами і місяцями року.

Методи дослідження. Методологічну основу роботи становить комплексний підхід, який об'єднує методи математичної статистики та теорії ймовірностей для обробки гідрологічних рядів, гідролого-генетичний аналіз, класичний метод водного балансу річкових басейнів, порівняльно-географічний та розрахунково-графічний методи, а також сучасні геоінформаційні технології просторового аналізу рельєфу та інтерполяції полів метеохарактеристик.

Вихідні дані. Інформаційну базу кваліфікаційної роботи склали багаторічні ряди даних систематичних спостережень мережі Українського гідрометеорологічного центру на замикальних та проміжних гідрологічних постах басейну річки Збруч, а також дані репрезентативних метеорологічних станцій регіону за період 1961–2020 рр., отримані з офіційних архівів

Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського. Крім того, було залучено картографічні матеріали, цифрові моделі рельєфу та відкриті звітні дані Дністровського басейнового управління водних ресурсів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження мають безпосереднє практичне застосування для актуалізації нормативно-розрахункової бази водогосподарського проектування та планування в басейні Збруча з урахуванням нових кліматичних реалій. Отримані кількісні оцінки перерозподілу складових водного балансу та виявлені тенденції зменшення або збільшення сезонної водності є безпосередньою основою для оптимізації лімітів водокористування, регулювання меженних екологічних витрат та розробки планів управління річковим басейном (ПУРБ) Дністра в межах суббасейну Збруча, що орієнтовані на збереження та відновлення водного потенціалу регіону.

Структура й обсяг наукової роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, трьох взаємопов'язаних розділів, загальних висновків та списку використаних джерел, який налічує 21 найменування. Повний обсяг основної текстової частини дослідження становить 53 сторінки.

РОЗДІЛ 1

СПЕЦИФІКА БАСЕЙНУ Р. ЗБРУЧ ТА ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ РІЧКОВОГО СТОКУ

1.1 Географічне положення та гідрографічна мережа басейну р. Збруч

Річка Збруч є однією з найбільш репрезентативних і значних лівих приток Середнього Дністра. Її басейн розташований у західній частині України, на території Подільської височини, і відіграє роль природної адміністративної межі між Тернопільською та Хмельницькою областями (рис. 1.1). Географічне положення басейну Збруча в межах лісостепової зони зумовлює специфіку формування його водного режиму, оскільки ця територія знаходиться у смузі переходу від помірно-вологого атлантично-континентального клімату до більш континентальних умов сходу країни. Витік річки бере свій початок з джерел поблизу села Щаснівка Підволочиського району Тернопільської області на висоті близько 340 метрів над рівнем моря, у межах пасма Авратинської височини (що є частиною Подільського плато). Збруч тече переважно у меридіональному напрямку з півночі на південь і впадає у Дністер поблизу села Окопи Борщівського району Тернопільської області. Загальна довжина річки становить близько 244-247 км, а площа водозбірного басейну складає 3330 квадратних кілометрів, що відносить її до категорії середніх річок України [14, 15].

Гідрографічна мережа басейну річки Збруч характеризується асиметричною структурою, що чітко простежується при порівнянні правобережної (тернопільської) та лівобережної (хмельницької) частин водозбору. Ця асиметрія безпосередньо впливає на гідродинамічні процеси та час добігання талих і дощових вод до головного русла. Загалом річка приймає велику кількість малих приток, більшість з яких мають довжину менше 10 км і формують густу мережу яружно-балкового типу. Серед найбільших правих приток, що дренують східні схили Товтрової гряди, слід виділити річки Гнила, Самчик, Самець, Вільховий Потік, Боричівка, Королівка, Крикливець. З лівого

боку в Збруч впадають такі значні притоки, як Самець-Подільський, Кума, Жванчик, Киселівка, Шмита, Потік та інші малі водотоки Хмельниччини [2, 3].

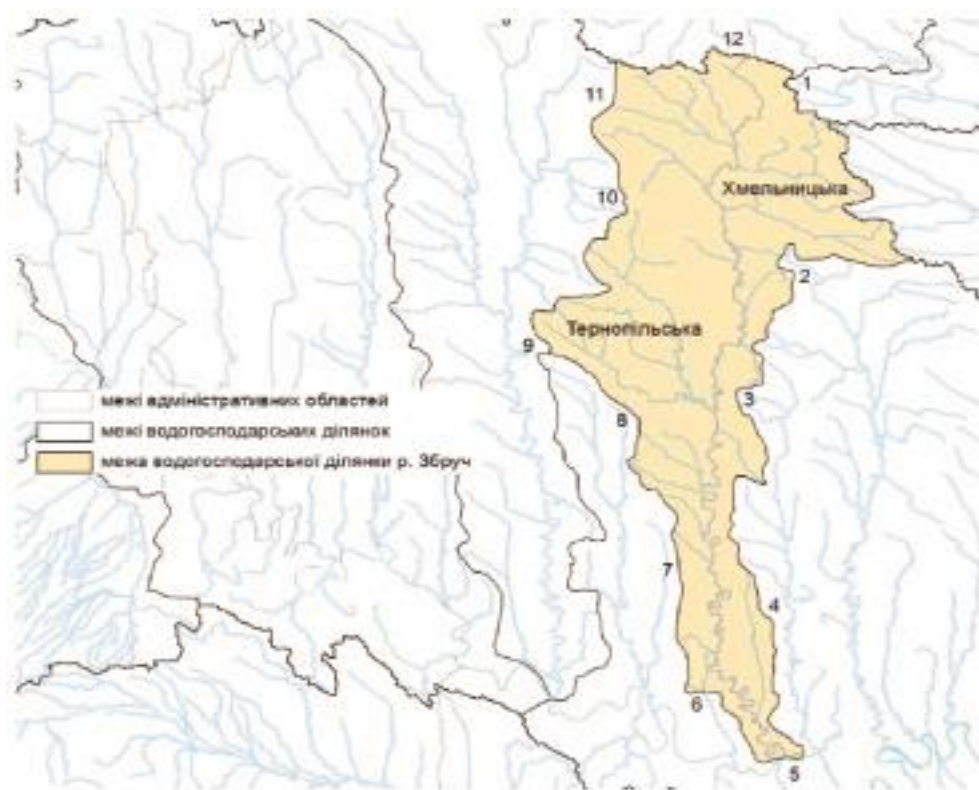


Рис. 1.1. Картохема басейну р. Збруч (водогосподарська ділянка M5.2.0.08) [9]

Густота річкової мережі басейну є неоднорідною: у верхній та середній частинах вона є дещо вищою завдяки активному розчленуванню плато, тоді як у нижній течії поверхневий стік частково переводиться у підземний через інтенсивний розвиток карстових процесів у вапнякових породах Товтр. Гідрографічний вигляд самого русла Збруча суттєво змінюється від витoku до гирла. У верхній течії річка протікає по широкій, місцями заболоченій долині, русло тут звивисте, чергується плесами та перекатами. У середній та, особливо, нижній течіях долина Збруча звужується, набуваючи каньйоноподібного або V-подібного характеру з крутими, скелястими схилами, висота яких подекуди досягає 80–100 метрів. Русло стає більш порожистим, а швидкість течії зростає, що зближує гідрологічні характеристики нижнього Збруча з річками

передгірського типу та суттєво прискорює трансформацію паводкових хвиль у замикальних створах [10, 18].

1.2 Рельєф, геологічна будова та ґрунтовий покрив як чинники стоку

Морфометричні характеристики рельєфу, особливості геологічного фундаменту та специфіка ґрунтового покриву басейну річки Збруч виступають найважливішими інваріантними чинниками, які трансформують кліматичні сигнали (опаді, температура) у безпосередні параметри річкового стоку. Геоморфологічно басейн повністю приурочений до Подільської піднятої платоподібної рівнини, яка має загальний ухил у південному та південно-східному напрямках до долини Дністра. Середні висоти басейну коливаються в межах 250–350 метрів. Головним орографічним акцентом і гідрологічним екраном території є Медобори (Товтрова гряда) — унікальний неогеновий рифовий бар'єр, який перетинає басейн Збруча у середній течії. Круті схили Товтр зумовлюють високі значення місцевих похилів поверхні, що сприяє швидкому переведенню атмосферних опадів у поверхневий зливовий стік і створює передумови для формування стрімких слівних паводків на малих притоках. Навпаки, платоподібні ділянки межиріч характеризуються спокійним рельєфом, де волога затримується довше, піддаючись інфільтрації та випаровуванню [7, 10].

В геологічній будові басейну беруть участь кристалічні породи докембрійського фундаменту (граніти, гнейси), які залягають на значній глибині і перекриті потужним чохлам осадових відкладів палеозою, мезозою та кайнозою. Для гідрологічних процесів вирішальне значення мають силурійські, крейдові та неогенові відклади, представлені вапняками, доломітами, мергелями, пісковиками та гіпсами. Наявність тріщинуватих вапняків Товтрової гряди та неогенових гіпсів обумовлює надзвичайно високу інтенсивність розвитку

карстових та суфозійних процесів. Карст є специфічним регулятором стоку Збруча: велика кількість понорів, печер та тріщин перехоплює значну частину поверхневого стоку малих водотоків, переводячи його у потужні підземні водоносні горизонти. Це призводить до того, що підземне живлення річки Збруч є одним із найвищих серед усіх лівих приток Дністра. Карстові води забезпечують високу водну стабільність річки в періоди глибоких літніх та зимових меженей, нівелюючи ризики повного пересихання головного русла, хоча дрібні притоки у карстових районах можуть періодично втрачати поверхневий стік. Зверху геологічні структури покриті товщею антропогенових еолово-делювіальних лесів та лесоподібних суглинків, які мають високу пористість та інфільтраційну здатність, що обмежує миттєвий поверхневий стік під час обложних дощів малої інтенсивності [10, 14, 15].

Грунтовий покрив басейну річки Збруч сформувався в умовах лісостепової зони під дією широколистяних лісів та лугової рослинності на лесових породах. Основну площу водозбору займають глибокі та типові малогумусні чорноземи, а також сірі лісові, темно-сірі опідзолені та ясно-сірі ґрунти. У долинах річок поширені лучні, лучно-болотні та алювіальні ґрунти. Сірі лісові та опідзолені ґрунти, що переважають у горбистих районах Медоборів, характеризуються середньою водопроникністю; у випадку руйнування їхньої структури внаслідок розорювання вони стають схильними до опливання та утворення кірки, що різко знижує інфільтрацію і стимулює ерозійні процеси та поверхневий змив під час літніх злив. Натомість потужні чорноземи плато мають відмінну комкувато-зернисту структуру, високу вологоємність та водопроникність. Вони здатні поглинати велику кількість весняних талих вод та опадів, переводячи їх у внутрішньогрунтовий (грунтово-підкірковий) стік, який розвантажується у річкову мережу поступово, згладжуючи гідрографи водності та зменшуючи амплітуду пікових витрат води [10, 14, 15].

1.3 Кліматичні особливості району дослідження

Клімат басейну річки Збруч є помірно-континентальним з м'якою зимою і теплим, тривалим літом, що визначається його географічним положенням у південно-західній частині Східноєвропейської рівнини. Основним чинником кліматоутворення є сонячна радіація та циркуляційні процеси в атмосфері, де панівну роль відіграє західне перенесення повітряних мас. Атлантичні циклони, що приходять із заходу та північного заходу, приносять основну масу атмосферних опадів і зумовлюють зниження температури влітку та потепління і відлиги взимку. Вплив азорського антициклону в літні місяці зумовлює встановлення сухої та спекотної погоди, тоді як вторгнення арктичних повітряних мас узимку призводить до різких похолодань, які, проте, в останні десятиліття дедалі частіше перериваються тривалими періодами додатніх температур [1, 13].

Термічний режим басейну характеризується чітко вираженими сезонними коливаннями, проте порівняльний аналіз двох кліматичних періодів виявляє стійку тенденцію до зміщення середніх показників у бік потепління. Середня багаторічна температура повітря за історичний період становила близько $+7.2 - +7.5^{\circ}\text{C}$, збільшуючись з півночі на південь басейну. У сучасний кліматичний період (1991–2020 рр.) цей показник зріс до $+8.3 - +8.7^{\circ}\text{C}$ [17]. Найнайхолоднішим місяцем традиційно є січень (середня температура близько $-3.5...-4.5^{\circ}\text{C}$), а найнайтеплішим — липень ($+18.5...+19.8^{\circ}\text{C}$). Важливим гідрологічним викликом є значне зростання зимових температур: тривалість періодів із стійкими морозами скоротилася, а число днів із зимовими відлигами перевищує 40–50 днів за сезон. Це унеможливорює накопичення стійкого снігового покриву та призводить до суттєвого збільшення втрат на випаровування в холодну пору року.

Режим атмосферних опадів у басейні Збруча відзначається помірним зволоженням, причому основна їх частина (до 70–75%) випадає в теплий період

року (травень–жовтень) у вигляді дощів. Середня річна сума опадів коливається в межах 600–700 мм, із максимумом у червні та липні (до 90–100 мм на місяць) і мінімумом у січні–лютому. Сучасні кліматичні зміни мало вплинули на загальну річну суму опадів, але докорінно трансформували їхню внутрішньорічну структуру. Замість тривалих фронтальних дощів дедалі частіше спостерігаються конвективні зливи надвисокої інтенсивності, коли за добу може випасти до 15–20% річної норми вологи. Взимку ж частка твердих опадів у вигляді снігу катастрофічно зменшилася, поступившись місцем мокрому снігу та дощам, що повністю ламає класичні схеми формування весняного сніготанення. Паралельно із цим, зростання дефіциту вологості повітря в літні місяці призводить до різкої інтенсифікації сумарного випаровування за методом Константинова (зростання з 550 до 571 мм), що переводить регіон Поділля у фазу наростання гідрологічної посушливості у літньо-осіння межень [17, 19].

1.4 Антропогенне навантаження та водогосподарське використання ресурсів басейну

Басейн річки Збруч зазнає тривалого та інтенсивного антропогенного впливу, що зумовлено високим рівнем господарського освоєння Подільського регіону. Головним чинником антропогенної трансформації умов стоку є надзвичайно висока розораність території, яка в окремих частинах водозбору (особливо на платоподібних лівобережних межиріччях Хмельниччини) досягає 70–75%. Масштабне сільськогосподарське виробництво призвело до практично повного знищення природного степового та лучно-степового рослинного покриву, а також до суттєвого скорочення площі лісових масивів (лісистість басейну наразі становить лише близько 11–13% і зосереджена переважно в межах природного заповідника «Медобори»). Розорювання схилів аж до прибережних захисних смуг порушує природну затримувальну здатність ландшафтів: під час

злив вода та змитий верхній шар ґрунту безперешкодно потрапляють у річкову мережу, викликаючи замулення русел малих приток, занесення понорів карстових систем та різке зростання каламутності води [14, 15].

Водогосподарський комплекс басейну Збруча характеризується розвиненою інфраструктурою штучного регулювання стоку. Для задоволення потреб сільського господарства, рибництва, енергетики та комунального сектору в басейні побудовано велику кількість штучних водойм. Безпосередньо на головному руслі річки Збруч та його притоках споруджено понад 15-20 водосховищ (найбільшими з яких є Мартинківське, Бодюгівське, Кудриницьке, Новоставське, Підволочиське) та сотні ставків різного призначення. Загальний об'єм штучно акумульованої води суттєво трансформує природний гідрограф річки. Штучне регулювання стоку призводить до зрізання піків паводків, але водночас створює величезні площі додаткового дзеркала випаровування. В умовах сучасного кліматичного потепління додаткові втрати води на випаровування з поверхонь ставків та водосховищ стають критичними, поглиблюючи маловоддя в літній період [14, 15].

Крім того, на Збручі функціонує каскад малих гідроелектростанцій (ГЕС), таких як Мартинківська, Кудриницька, Тарнавська, Борщівська та інші. Робота цих малих ГЕС в режимі добового регулювання викликає різкі штучні коливання рівнів води в нижніх б'єфах (так звані попуски), що негативно позначається на стабільності екосистем русла та спотворює результати вимірювань на гідрологічних постах. Комунальне водоспоживання та водовідведення міст і селищ, розташованих у басейні (Волочиськ, Підволочиськ, Гусятин, Скалат, Чемерівці), створює додаткове навантаження на якість водних ресурсів та змінює балансові показники, оскільки частина підземних вод, що вилучаються для водопостачання, повертається у русло у вигляді очищених або зворотних стічних вод, штучно змінюючи параметри мінімального меженного стоку [14, 15].

1.5 Роль р. Збруч у гідрологічній системі лівобережжя Середнього Дністра

В загальній гідрологічній структурі лівобережжя Середнього Дністра річка Збруч займає унікальне та стратегічно важливе місце. Серед таких лівих приток Дністра, як Стрипа, Серет, Смотрич, Мурафа, Збруч виділяється специфічним гідродинамічним режимом та балансовими характеристиками. Його головна роль полягає у забезпеченні стабільного гідрологічного транзиту вологи та розвантаженні потужних підземних водоносних горизонтів Поділля в головну артерію Південно-Західної України — Дністер. Завдяки значній площі водозбору (3406 км²) та великій протяжності, Збруч формує вагому частку бічного припливу води у Дністровське водосховище, що є життєво важливим для забезпечення стабільної роботи Дністровського комплексного гідровузла (ГЕС і ГАЕС) та водозабезпечення нижнього Дністра [19].

Унікальність Збруча в системі лівобережжя Дністра обґрунтовується, перш за все, його карстово-підземним живленням. Поки сусідні річки (наприклад, Смотрич чи Мурафа) в літні місяці зазнають глибокого обміління через меншу площу водозборів та менший ступінь взаємодії з глибокими водоносними шарами, Збруч демонструє вищу стійкість до гідрологічних посух. Товтрова гряда виступає в ролі гігантського природного гідрологічного акумулятора. Підземні карстові води, накопичені у вапнякових масивах Медоборів, безперервно дренуються руслом Збруча та його притоками. Це забезпечує підвищену частку підземного стоку у загальному річному водному балансі річки, що підтверджується стабільними витратами води в зимову та літню межені (як зафіксовано в розрахункових матеріалах роботи, де навіть за умов зменшення опадів шар річного стоку сучасного періоду збільшився до 127 мм за рахунок підземного дренажу та активізації танення взимку) [14, 15, 19].

Крім того, каньйоноподібна морфологія нижньої течії Збруча виконує функцію швидкого гідродинамічного скиду паводкових хвиль. Під час

інтенсивних літніх злив у Карпатах та на Поділлі, Збруч оперативно реагує на метеорологічні збурення, формуючи короткі, але потужні паводки, які швидко добігають до Дністра. Таким чином, річка виступає природним регулятором і стабілізатором гідрологічних процесів лівобережжя Середнього Дністра, поєднуючи в собі риси як стійкої рівнинної річки з потужним підземним живленням, так і активного транзитера зливових вод, що робить порівняльний аналіз його характеристик за різні кліматичні періоди фундаментальним етапом для розуміння еволюції водних ресурсів усього Дністровського басейну [19].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ВОДНИЙ БАЛАНС

2.1 Методи розрахунку основних гідрологічних характеристик річкового стоку

Обґрунтування методологічного підходу для розрахунку основних гідрологічних характеристик річкового стоку є фундаментальним етапом будь-якого гідрологічного дослідження, оскільки від точності та доцільності обраних методів залежить достовірність оцінки водних ресурсів і прогнозів їхньої трансформації. Головна складність сучасних гідрологічних розрахунків полягає в тому, що річковий стік формується під впливом комплексу складних, динамічних та просторово неоднорідних фізико-географічних і метеорологічних чинників. В умовах інтенсивних глобальних та регіональних кліматичних змін, які безпосередньо трансформують режим опадів і термічний стан атмосфери, традиційні підходи потребують критичного переосмислення та поєднання з новітніми розрахунковими технологіями. Методологічна база даного дослідження базується на системному поєднанні класичних методів математичної статистики, гідрологічної аналогії, емпіричного моделювання та сучасних геоінформаційних технологій, що дає змогу комплексно оцінити параметри стоку в басейні річки Збруч за різні кліматичні періоди [4-8, 12].

Основою для визначення часових закономірностей та параметрів річкового стоку є методи математичної статистики та теорії ймовірностей, які застосовуються до багаторічних рядів гідрологічних спостережень. Головними характеристиками, що підлягають розрахунку, є середній багаторічний стік (норма стоку), коефіцієнти варіації (C_v) та асиметрії (C_s), а також розрахункові витрати води заданої ймовірності перевищення (забезпеченості). Обґрунтування використання статистичного аналізу базується на положенні про те, що багаторічні коливання стоку є стохастичним процесом, який підпорядковується

певним законам розподілу ймовірностей. У вітчизняній гідрологічній практиці для апроксимації емпіричних кривих забезпеченості традиційно застосовують трипараметричний гамма-розподіл Крицького-Менкеля або розподіл Пірсона III типу. Вибір цих теоретичних кривих розподілу зумовлений їхньою гнучкістю та здатністю точно описувати асиметричні гідрологічні ряди, де мінімальні та максимальні витрати води суттєво відхиляються від середнього значення. Розрахунок статистичних параметрів здійснюється методом найбільшої правдоподібності або методом моментів, що дозволяє мінімізувати похибки, пов'язані з обмеженістю довжини рядів спостережень, та забезпечити репрезентативність отриманих нормативних показників [5, 12].

Оскільки тривалість і безперервність спостережень на різних гідрологічних постах у басейні досліджуваної річки не є однорідною, важливе місце в методології займає метод гідрологічної аналогії та методи приведення коротких рядів спостережень до тривалого періоду. Обґрунтування цього підходу базується на законі географічної зональності та гідрологічної подібності. Як річки-аналоги обираються водотоки, які мають подібні фізико-географічні умови формування стоку, близькі морфометричні характеристики басейнів (площа, середня висота, залісеність) та розташовані в межах тієї ж кліматичної зони. Приведення параметрів стоку до єдиного розрахункового періоду здійснюється за допомогою методів парної або множинної лінійної регресії, що дозволяє нівелювати вплив випадкових коливань водності окремих років і забезпечити порівнюваність результатів між різними часовими інтервалами (двома кліматичними періодами) [7].

Особливу увагу в межах даного дослідження приділено методам розрахунку складових водного балансу, оскільки річковий стік є результуючою величиною балансового рівняння, де прихідна частина формується опадами, а витратна — сумарним випаровуванням та річковим стоком. Для розрахунку сумарного випаровування (евапотранспірації) з поверхні річкового басейну обґрунтовано застосування методу Константинова А.Р. Цей метод належить до числа найбільш надійних емпіричних підходів у метеорології та гідрології,

оскільки він базується на зв'язку випаровування з градієнтами температури та вологості повітря, вимірними на стандартній висоті (2 метри над поверхнею). На відміну від спрощених формул, що враховують лише температуру, метод Константинова дозволяє врахувати дефіцит вологості повітря, що в умовах сучасного потепління та зростання посушливості є критично важливим для точного визначення втрат вологи. Розрахунок за цим методом дає змогу диференціювати об'єми випаровування по місяцях та сезонах, що є основою для подальшого порівняльного аналізу внутрішньорічного розподілу стоку та оцінці змін водного балансу за різні часові інтервали [6, 11, 17].

Для урахування просторової неоднорідності басейну річки Збруч, яка характеризується переходом від плоских рівнинних ландшафтів Поділля до розчленованих рельєфних форм, класичні гідрологічні методи доцільно інтегрувати з геоінформаційними технологіями. Застосування ГІС-інструментарію (зокрема, програмного комплексу ArcGIS або QGIS) обґрунтовується необхідністю точного визначення вагових коефіцієнтів для різних висотних зон та піделементів басейну. Використання інструментів просторового аналізу, таких як *Spatial Analyst Tools*, дозволяє здійснювати автоматизовану обробку цифрових моделей рельєфу (DEM) та растрових файлів (наприклад, у форматі TIF). Поділ басейну на окремі ділянки із заданими висотними інтервалами та подальша конвертація растрів у векторні шейп-полігони за допомогою *Conversion Tools* забезпечує високу точність обчислення площ водозборів та їх морфометричних характеристик. Це дозволяє відійти від грубого усереднення метеорологічних параметрів (опадів і температури) по всьому басейну і перейти до методу зваженого середнього, де вага кожної метеостанції або висотної зони визначається її реальною площею, що суттєво підвищує точність кінцевого рівняння водного балансу [17, 20].

При аналізі внутрішньорічного розподілу стоку застосовується метод компонування гідрологічного року за сезонами та місяцями, а також метод розрахунку коефіцієнтів нерівномірності стоку. Обґрунтування розподілу річного циклу на окремі гідрологічні сезони (весняне водопілля, літньо-осіння

межень, зимова межень) базується на генетичному принципі живлення річки. Оскільки в сучасний період межі сезонів стали розмитими через кліматичні аномалії (раннє сніготанення, зимові паводки), порівняльний аналіз виконується на основі жорстко фіксованих календарних періодів та рухомих гідрологічних меж. Це дає змогу математично зафіксувати зміщення хвиль водопілля та оцінити трансформацію маловодних періодів [4-6, 10, 12].

На завершення, важливим елементом методології є розрахунок і оцінка похибок та нев'язок водного балансу. Згідно з гідрологічними стандартами, метод вважається правомірним та допустимим, якщо величина невирішеного залишку (нев'язки) рівняння водного балансу для багаторічного періоду не перевищує 15–20% від загальної суми атмосферних опадів, а для окремих детально вивчених басейнів становить менше 5%. Зведення балансу із використанням вагових коефіцієнтів для замикальних і проміжних гідропостів дозволяє взаємно ув'язати поверхневий і підземний сток, мінімізуючи системні похибки вихідних даних. Таким чином, запропонований комплекс методів — від статистичного аналізу рядів спостережень до ПС-моделювання та балансових розрахунків за методом Константинова — утворює цілісну, науково обґрунтовану методичну схему, спроможну забезпечити високу точність порівняльного аналізу гідрологічного режиму річки Збруч у два різні кліматичні періоди [17, 20].

2.2 Методика визначення складових водного балансу басейну

Серед сучасних українських дослідників фундаментальний внесок у розвиток водно-балансових досліджень на басейновому рівні зробили Галущенко Н.Г., Гушля А.В., Мезенцев В.С., Яцик А.В. Гребінь В.В. та інші [1, 7, 10, 11, 17].

Водний баланс — це кількісне вираження закону збереження маси стосовно вологи, що застосовується до чітко визначеної просторово-часової системи. Ґрунтується на принципі: будь-яка кількість води, яка надходить у систему за

певний проміжок часу, дорівнює кількості води, що з неї виходить, з урахуванням зміни внутрішніх запасів вологи. Водний баланс річкових басейнів є одним із ключових об'єктів дослідження сучасної гідрології. В умовах зростаючого антропогенного навантаження та глобальних кліматичних змін, які охоплюють майже всі регіони планети, кількісне розуміння структури водного балансу, його складових, механізмів акумуляції й транзиту вологи стає необхідною науковою основою: для оцінки водних ресурсів, для прогнозування екстремальних гідрологічних явищ та багато чого іншого [4].

Порядок складання водного балансу включає декілька етапів, кожен з яких потребує певного методологічного забезпечення та вихідних даних. Насамперед розпочинається з того, що потрібно визначити просторові межі досліджуваного басейну, іншими словами, контрольну область (водозбір) та часовий інтервал. Контрольною областю вважають простір, у якому потоки води, енергії та інших речовин або ж зберігаються всередині, або ж переносяться. Часовий інтервал являє собою часовий масштаб (місяць, сезон, рік або ж подія, тощо), протягом якого оцінюються зміни запасів у контрольній області. Вибір просторових меж є досить принциповим: для річкового басейну геоморфологічний та гідрогеологічний вододіли можуть не збігатися, особливо в карстових або ж тріщинуватих породах, де підземний стік перетинає поверхневий вододіл. Ця проблема є актуальною для суббасейну р. Прут в зв'язку з наявністю тріщинуватих флішових порід, які мають латеральну фільтрацію між сусідніми водозборами [4, 7].

На наступному етапі збирають та обробляють вихідні дані: ряди спостережень за опадами, температурою, вологістю з метеостанцій, дані про витрати води на гідрологічних постах для розрахунку стоку, для більш розширеної оцінки, застосовують матеріали агрометеорологічних спостережень та зондування ґрунту для оцінки запасів вологи, також дані про рівень та хімічний склад підземних вод. Основним визначальним чинником точності балансових розрахунків є якість та репрезентативність вихідних даних. Для гірської (верхньої) частини досліджуваного суббасейну щільність мережі

спостережень є недостатньою, наприклад деякі ділянки висотних поясів вище 1000 м н.р.м. майже позбавлені стаціонарних метеорологічних спостережень, що примушує застосовувати методи просторової інтерполяції з урахуванням висотних поправок.

Розрахунок середнього багаторічного водного балансу для досліджуваного басейну проводиться за гідрологічний рік. Протягом гідрологічного року завершується водно-балансовий цикл накопичення та витрачання вологи на водозборі, і запаси вологи, що переходять з року в рік, є найменшими. Початок та закінчення гідрологічного року для кожного річкового басейну є індивідуальними і залежать від кліматичних умов [4, 7, 20, 21]. За початок гідрологічного року приймається місяць осіннього періоду, коли:

$$P_{\text{сер міс}} > (R+E)_{\text{сер міс}} . \quad (2.1)$$

За закінчення гідрологічного року приймається місяць літньої чи осінньої межі при:

$$P_{\text{сер міс}} < (R+E)_{\text{сер міс}} . \quad (2.2)$$

Далі розраховують кожен складову водного балансу: просторово осереднені опади на території басейну (P), сезонний та річний стік (R), сумарне випаровування (E), зміна ґрунтових та снігових запасів вологи. На останньому етапі оцінюють водний баланс, порівнюючи суму прихідних складових з сумою витратних, а також зміною запасів. Нев'язка при розрахунку балансу є важливою частиною та неминучою, оскільки при вимірюваннях та розрахунках є мінімальна похибка. Величина невязки для якісного розрахунку водного балансу не має перевищувати 5 - 10 % від суми прихідних складових. Якщо ж невязка розрахунку більша, це може свідчити про систематичні помилки у вихідних даних, або ж про неврахування окремих статей балансу тощо.

Відповідно до закону збереження маси, швидкість зміни запасів води в гідросистемі за будь-який проміжок часу повинна дорівнювати різниці між швидкостями надходження та відтоку води через її межі. Рівняння водного балансу використовується для того, щоб якісно описати рух води в гідросистемі та кількісно оцінити швидкість зміни запасів води в ній. Масштаб ділянки басейну може бути як невеликою ділянкою, так і досягати цілого водозбору.

Загальне рівняння водного балансу річкового водозбору за будь який проміжок часу має вигляд:

$$P = R + E \pm \Delta W \quad (2.3)$$

де P – сума атмосферних опадів, яка випадає на водозбір мм;

R - річковий стік (поверхневий + підземний) з водозбору через замикальний створ, мм;

E - сумарне випаровування, мм;

$\pm \Delta W$ - зміна запасів вологи у басейні (грунт + сніг + підземні води), за досліджуваний період, мм. $+\Delta W$ показує зменшення запасів вологи, а $-\Delta W$ - накопичення запасів (частина опадів акумулюється).

Якщо розраховувати складові водного балансу за багаторічний період, то атмосферні опади, річковий стік води, сумарне випаровування визначаються як середні арифметичні (норми) за цей період, а зміна запасів вологи у басейні (накопичення та витрачання) врівноважується і величина $\pm \Delta W$ прямує до нуля. Отже, за багаторічний період рівняння водного балансу можна записати як:

$$P = R + E \quad (2.4)$$

На структуру рівняння водного балансу суттєво впливає часовий масштаб розрахунків. Така двочленна форма подання називається рівнянням кліматичного водного балансу, яке дозволяє отримати стаціонарні характеристики водного балансу, придатні для кліматичного аналізу, а також регіональних співставлень.

Основною умовою розрахунків є те, що всі елементи рівняння мають бути виміряні або обчислені незалежними методами. Оскільки вимірювання завжди мають певну похибку, рівняння зазвичай не замикається (алгебраїчна сума не дорівнює нулю). Чим менша ця «нев'язка», тим точніше складено баланс.

2.3 Короткий аналіз сучасних кліматичних викликів та наслідків

Сучасна трансформація глобальної кліматичної системи є одним із найбільших викликів для людства у XXI столітті, оскільки її наслідки мають всеосяжний характер і безпосередньо впливають на гідрологічний режим річкових басейнів, функціонування екосистем та стабільність соціально-економічного розвитку. Науково доведеним фактом, зафіксованим у звітах Міжурядової групи експертів з питань змін клімату (ІРСС), є безпрецедентне зростання середньої температури приземного шару атмосфери, зумовлене антропогенним чинником — насамперед інтенсивним викидом парникових газів. Проте глобальне потепління не є лінійним чи однорідним процесом. Його виклики проявляються у складній перебудові циркуляційних процесів атмосфери, зміні термодинамічних параметрів, деструкції стабільних кліматичних зон та різкому зростанні частоти й інтенсивності екстремальних метеорологічних явищ. Обґрунтування дослідження гідрологічних характеристик на локальному рівні вимагає глибокого розуміння цього трирівневого ланцюга змін: від планетарних тенденцій через загальноєвропейські закономірності до конкретних регіональних проявів в межах України [1, 11, 13, 17, 19-21].

На глобальному рівні ключовим викликом кліматичних змін є порушення планетарного енергетичного та водного балансу. Підвищення середньої глобальної температури (яка вже перевищила доіндустріальний рівень більш ніж на 1,1–1.2°C) призводить до інтенсифікації світового гідрологічного циклу за

законом Клаузіуса-Клапейрона: з підвищенням температури повітря на кожен градус Цельсія його здатність утримувати вологу зростає приблизно на 7%. Це зумовлює масштабний перерозподіл опадів на планеті. У вологих тропічних та високоширотних регіонах фіксується тенденція до надмірного зволоження, тоді як в аридних та семіаридних зонах поглиблюється дефіцит водних ресурсів. Глобальними наслідками цих процесів є прискорене танення материкових і гірських льодовиків, деградація вічної мерзлоти, підвищення рівня Світового океану та закислення морських вод. З гідрологічної точки зору, планетарний виклик полягає у втраті стаціонарності гідрологічних рядів. Класичні методи розрахунку норми стоку, що базувалися на припущенні про незмінність середніх кліматичних умов у часі, втрачають свою адекватність, оскільки гідрологічне «минуле» більше не є надійним індикатором «майбутнього» [1, 13, 20, 21].

Європейський континент, в силу своїх географічних особливостей та специфіки взаємодії океанічних і материкових повітряних мас, реагує на глобальне потепління значно вищими темпами, ніж планета в середньому. За даними Європейського агентства з навколишнього середовища, температура в Європі зростає приблизно вдвічі швидше за загальносвітовий показник. Основним кліматичним викликом для Європи є поглиблення просторово-часової асиметрії зволоження між північними та південними регіонами, що часто описується науковою парадигмою «Північ стає вологшою, Південь — сухішим». Південна Європа та Середземномор'я потерпають від тривалих і жорстких посух, катастрофічного зниження рівня ґрунтових вод та висихання малих річок. Натомість Північна та Центральна Європа стикаються із загрозою масштабних повеней та паводків, викликаних інтенсивними зливами (як це демонстрували масштабні катастрофічні паводки останніх років). Крім того, для європейського континенту характерна зміна поведінки Північноатлантичного коливання (NAO), що трансформує траєкторії руху атлантичних циклонів. Внаслідок цього послаблюється західне перенесення повітряних мас у літній період, що призводить до блокування антициклонів та формування затяжних хвиль тепла

(так званих «heat waves»), які різко збільшують сумарне випаровування та виснажують річковий стік [20, 21].

Україна, знаходячись у глибині європейського континенту, відчуває на собі виклики як глобального потепління, так і специфічних внутрішньоконтинентальних процесів. Темпи зростання середньорічної температури повітря в Україні також випереджають середні світові показники і становлять понад $0,4\text{--}0,5^{\circ}\text{C}$ за десятиріччя. Головним регіональним викликом для нашої держави є виражена трансформація термічного та радіаційного режимів, що веде до суттєвого зсуву кліматичних зон у північному напрямку (фактично, межі природних зон Полісся, Лісостепу та Степу зміщуються на 100–150 км на північ). Це супроводжується зростанням тривалості вегетаційного періоду, зменшенням кількості днів із морозним та сніжним покривом узимку та катастрофічним збільшенням числа днів із температурою вище $+30^{\circ}\text{C}$ у літній період [1, 13].

Особливе наукове обґрунтування в контексті України має аналіз режиму атмосферних опадів. Хоча сумарна річна кількість опадів у середньому по країні змінюється незначно, кардинально трансформується їхня структура та внутрішньорічний розподіл. Замість тривалих, обложних дощів малої та середньої інтенсивності, які ефективно насичували ґрунт вологою, переважають короткочасні зливи зливого характеру. Під час таких явищ за кілька годин може випасти місячна норма опадів, проте ця волога не встигає інфільтруватися у водоносні горизонти і швидко стікає поверхневим шляхом, спричиняючи локальні паводки та ерозію ґрунтів, не покращуючи при цьому загальну водність басейнів.

Гідрологічні виклики кліматичних змін в Україні найяскравіше проявляються у перебудові фазового складу річкового стоку та зміні його сезонного розподілу. Через теплі, малосніжні зими з частими тривалими відлигами тверді опади практично не накопичуються на водозборах у вигляді стійкого снігового покриву. Як наслідок, класичне весняне водопілля, яке історично було головною фазою водного режиму українських річок (і

забезпечувало до 60–70% річного об'єму стоку), поступово нівелюється, стає розпластаним або взагалі відсутнє. Натомість відбувається перерозподіл стоку на зимові місяці за рахунок формування тало-дощових хвиль. У літньо-осінній період через надвисокі температури повітря критично зростають втрати на сумарне випаровування, що веде до встановлення тривалої, глибокої і маловодної межені, під час якої малі та середні річки втрачають гідродинамічний зв'язок із підземними водами та катастрофічно міліють або повністю пересихають [11].

Для Західної України та Поділля, де протікає річка Збруч, ці виклики мають додаткову специфіку. Цей регіон традиційно належав до зони достатнього зволоження, проте зараз він перебуває на етапі зростання кліматичної нестабільності. Підвищення випаровуваності за методом Константинова (що було детально обґрунтовано в методологічній частині роботи) призводить до того, що навіть за умови збереження історичної норми опадів реальне зволоження територій зменшується, формуючи так звані «гідрологічні посухи». Водночас геоморфологічні особливості басейнів (наявність карстових порід, розчленування рельєфу) зумовлюють високу чутливість підземної та поверхневої складових водного балансу до найменших коливань температури.

Таким чином, комплексне теоретичне обґрунтування сучасних кліматичних викликів показує, що планетарне потепління запускає складний каскадний механізм змін. Глобальне підвищення температури через загальноєвропейські циркуляційні аномалії трансформується в конкретні регіональні загрози для водних ресурсів України. Зниження водності в меженні періоди, деградація малих річок, зникнення класичного весняного водопілля та зростання ризиків екстремальних паводків вимагають детального перегляду стратегій управління водними ресурсами.

РОЗДІЛ 3

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГІДРОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТА СКЛАДОВИХ ВОДНОГО БАЛАНСУ В БАСЕЙНІ РІЧКИ ЗБРУЧ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

3.1 Вихідна база гідрометеорологічних даних

Для дослідження та аналізу складових водного балансу необхідні дані стаціонарних пунктів спостереження, що розташовані на водозборі або поблизу нього.

Як видно з рис. 3.1 в басейні річки Збруч, який є окремою водогосподарською ділянкою площею 3406 км², спостереження за водністю проводять на двох гідрологічних постах:

- м. Волочиськ, що охоплює верхню частину басейну з площею водозбору 712 км² та з періодом інструментальних спостережень за стоком води з 1957 р.;
- с. Завалля, що охоплює майже весь басейн, площею водозбору 3240 км² з періодом інструментальних спостережень за стоком води з 1971 р.

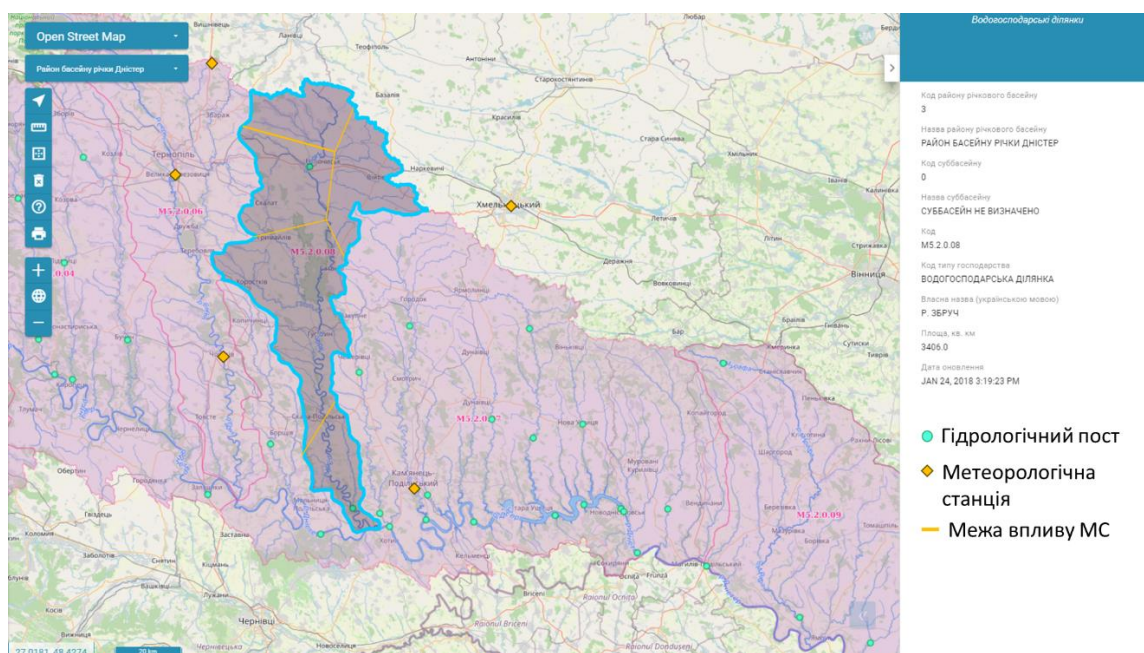


Рис.3.1. Мережа спостережень за гідрометеорологічними даними в басейні р. Збруч (ВГД M5.2.0.08) [9]

Пункти спостережень за метеорологічними характеристиками, які обрані для дослідження складових водного балансу, включають дані за період 1961-2020 рр. по таких метеостанціях, як Кременець, Тернопіль і Чортків в Тернопільській області та Хмельницький і Кам'янець-Подільський в Хмельницькій області.

3.2 Аналіз хронологічних графіків коливань річного стоку та оцінка водності річок за даними гідрологічних постів в басейні р. Збруч

Аналіз хронологічної динаміки річного стоку є фундаментальним етапом дослідження, що дозволяє виявити закономірності багаторічних коливань водності та оцінити ступінь їхньої трансформації під впливом сучасних кліматичних змін. Для басейну річки Збруч такий аналіз базується на опрацюванні довгих рядів спостережень на ключових гідрологічних постах, які репрезентують верхню та середню частини водозбору. Використання хронологічних графіків у поєднанні з інтегральними кривими стоку дає змогу не лише візуалізувати чергування маловодних та багатоводних фаз, а й об'єктивно порівняти структуру річного стоку між двома розрахунковими періодами кліматичної норми: 1961–1990 рр. та 1991–2020 рр. Це, у свою чергу, є підґрунтям для гідролого-генетичної інтерпретації причин сучасного зниження водності та деградації весняного водопілля, що є характерним для річок басейну Дністра в останні десятиліття [11, 17]

На представленій діаграмі (рис. 3.2) відображено хронологічний хід середньорічних модулів стоку по двох водозборах в басейні річки Збруч із замикаючим створом у м. Волочиськ (верхня течія) та с. Завалля (нижня течія) за період інструментальних спостережень за стоком з 1957 по 2020 роки.

І перше, що привертає увагу, це аномальне збільшення модуля стоку р. Збруч – с. Завалля 1982-1984 рр, 1986 р., 1999 р., 2003-2015р. та 2018-2019 рр.

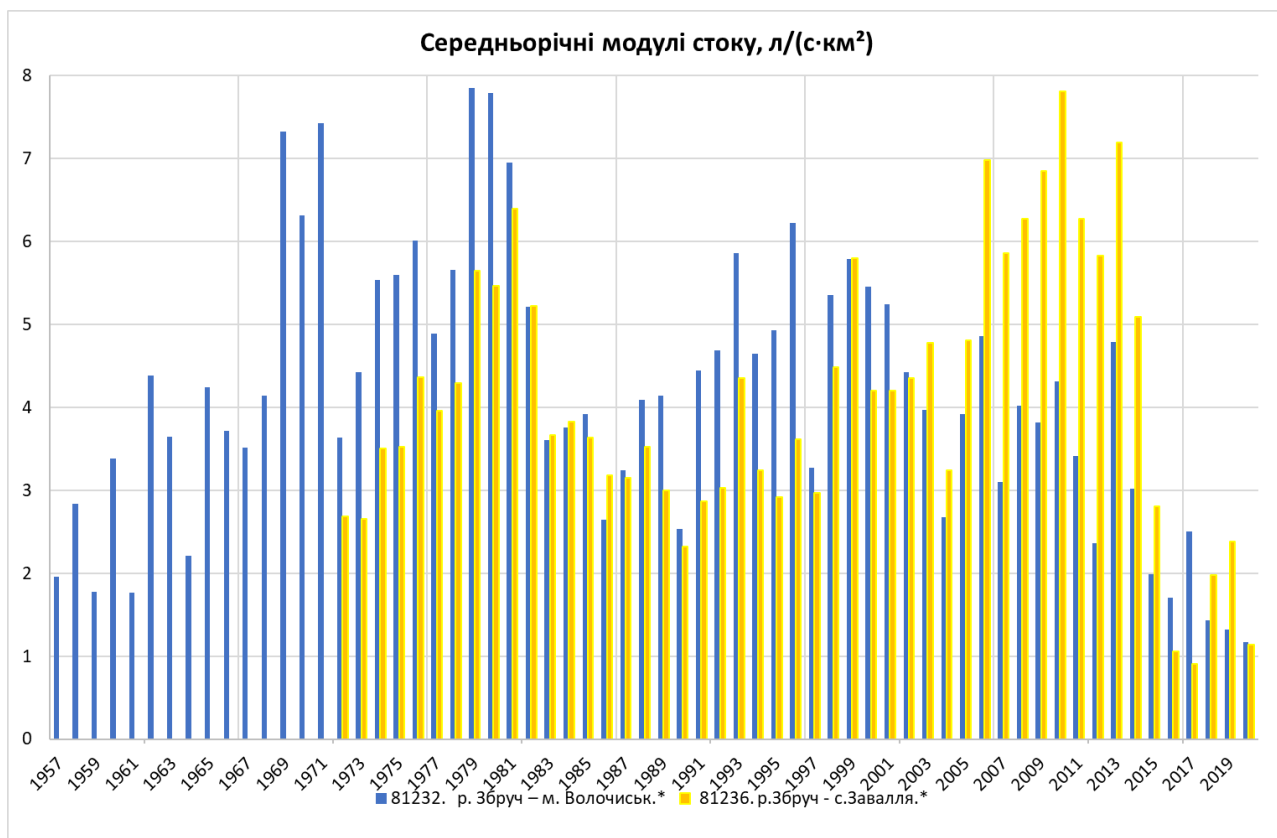


Рис. 3.2. Хронологічний графік зміни середньорічного модуля стоку в басейні р. Збруч – м. Волочиськ (верхів'я) та р. Збруч – с. Завалля

Це може бути наслідком як більшої кількості опадів у південній частині басейну (Товтри), так і впливу карстового живлення, що акумулюється в нижній течії. При цьому середній багаторічний середньорічний модуль стоку для р. Збруч – м. Волочиськ становить 4,14 л/(с·км²), а для р. Збруч – с. Завалля – 4,11 л/(с·км²). Тому представляє інтерес дослідити циклічність та визначити фази водності по досліджуваних водозборах.

Вивчення циклічних коливань у рядах гідрологічних спостережень є фундаментальним складником аналізу та прогнозування водного режиму. Річковий стік підпорядковується певним періодичним закономірностям, що формуються під впливом комплексу природних чинників. Визначення строків настання цих циклів дозволяє глибше зрозуміти механізми формування стоку води на річках і забезпечує наукове підґрунтя для прийняття управлінських рішень у водному господарстві.

Багаторічна динаміка стоку безпосередньо залежить від динаміки зміни кількості опадів, температурного режиму, тривалості снігового покриву, а також глобальних процесів, таких як сонячна активність та океанічна циркуляція (зокрема, північноатлантичне коливання).

Гідрологічні цикли можуть охоплювати різні часові масштаби — від короткострокових (кілька років) до більш тривалих періодів.

Для обробки гідрологічної інформації використовується широкий інструментарій статистичних та математичних методів. Хоча хронологічні графіки (календарний хід стоку) дозволяють візуалізувати річну динаміку, вони часто виявляються недостатньо інформативними для виявлення глибинних закономірностей.

Для нівелювання впливу випадкових чинників та виділення прихованої циклічності застосовують один із найефективніших методів аналізу відхилень стоку від середніх багаторічних значень шляхом розрахунку ординат різницево-інтегральних кривих.

Алгоритм базується на використанні відносних величин — модульних коефіцієнтів (k_i), які розраховуються як відношення фактичного стоку за конкретний рік до норми стоку (середнього значення, прийнятого за одиницю). Це дозволяє перейти від абсолютних кубічних метрів до уніфікованих показників відносної водності [5]. Наступним кроком є послідовне підсумовування (інтегрування) відхилень модульних коефіцієнтів від середнього рівня ($k_i - 1$). В результаті маємо є криву, напрямок якої дає чітку характеристику водності: напрям вгору свідчить про фазу підвищеної водності, а напрям вниз вказує на фазу маловоддя, тобто стік у цей період нижче за середнє багаторічне значення.

Побудовані різницево-інтегральні криві середньорічних витрат води для водозборів р. Збруч – м. Волочиськ та р. Збруч – с. Завалля (рис. 3.3) показують зміну фаз водності на річках. Починаючи з 2014 р. спостерігається маловодна фаза по обох водозборах, проте для р. Збруч – м. Волочиськ вона настала ще раніше, з 2004 р. Також по всьому басейну спостерігалася маловодна фаза у період 1983-1990 рр. Багатоводна фаза на обох водозборах була у періоди 1977-

1982 рр. та 1998-2003 рр. У всі інші роки відмічалась протифаза у водності річок по басейну р. Збруч.

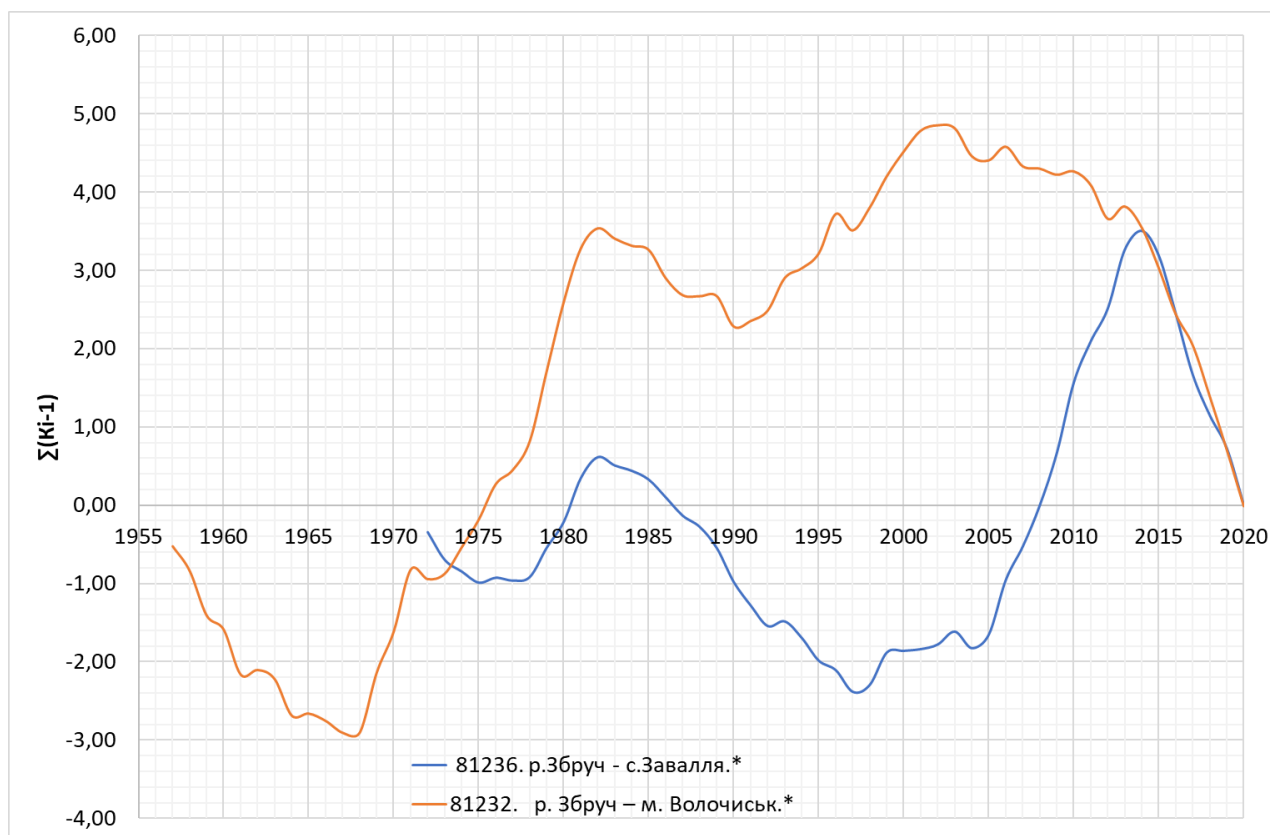


Рис. 3.3. Різницево-інтегральні криві середньорічних витрат води для двох водозборів р. Збруч – м. Волочиськ та р. Збруч – с. Завалля

Оскільки для порівняльного аналізу обрано період 1961-2020 рр. з деталізацією на два періоди кліматичної норми 1961-1990 рр. та сучасний період 1991-2020 рр., необхідно виконати подовження ряду спостережень для р. Збруч – с. Завалля, опираючись на дані р. Збруч – м. Волочиськ. Коефіцієнт кореляційного зв'язку досить високий ($r = 0,93$), що дозволяє виконати процедуру відновлення часового ряду р. Збруч – с. Завалля за період з 1961-1971 рр. опираючись на дані річки-аналога.

Проаналізуємо зміни фаз водності за два періоди 1961-1990 рр. та 1991-2020 рр. (рис. 3.4). Отже, за період кліматичної норми 1961-1990 рр. маємо маловодні фази 1961-1968 рр., 1982-1990 рр., а також для р. Збруч - с. Завалля з

1971 р. по 1977 р. Відповідно, у всі інші роки наставала багатоводна фаза. За період кліматичної норми 1961-1990 рр. більшість років були маловодні.

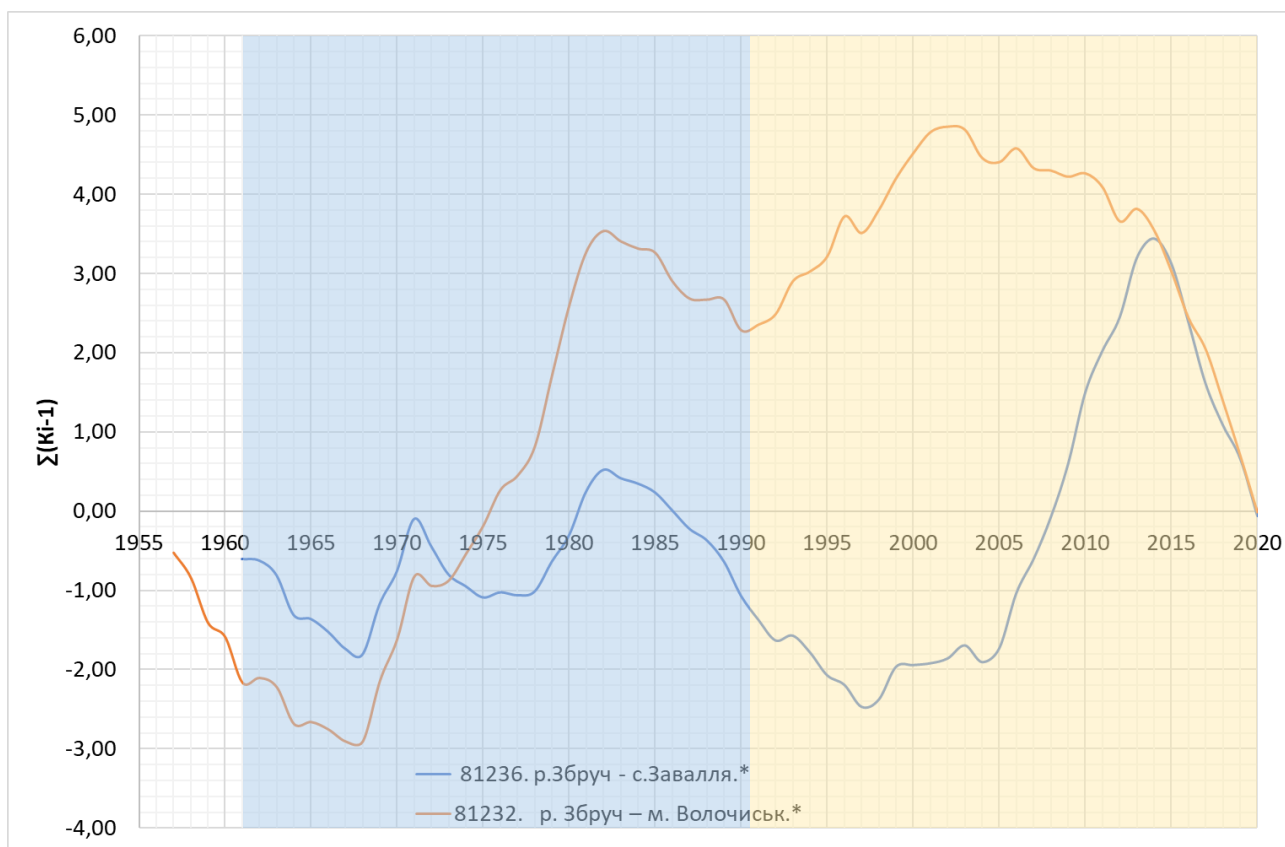


Рис. 3.4. Різничево-інтегральні криві середньорічних витрат води для двох водозборів р. Збруч – м. Волочиськ та р. Збруч – с. Завалля за досліджуваний період 1961-2020 рр.

У сучасний період 1991-2020 рр. для р. Збруч – м. Волочиськ багатоводна фаза тривала з 1991р. по 2003 р., тобто 13 років, у всі інші роки були маловодні. А для р. Збруч – с. Завалля багатоводний період був з 1998 р. по 2014 р., відповідно 17 років, а всі інші роки сучасного періоду були маловодні.

Таким чином, за весь досліджуваний період 1961-2020 рр. маємо як мінімум два повні цикли водності. При цьому в межах кожного 30-ти річного часового інтервалу маємо майже рівну кількість багатоводних і маловодних років.

3.3 Статистична оцінка часових рядів спостереження за стоком в басейні р. Збруч

Гідрологічні показники, зокрема річковий стік, рівні води та інтенсивність випаровування, відзначаються суттєвою просторово-часовою мінливістю, що надає їм вираженого імовірнісного характеру. Така випадковість не є свідченням відсутності фізичної детермінованості, а виникає як результат комплексного поєднання численних чинників, детальний облік кожного з яких є практично неможливим. Під час теоретичного обґрунтування процесів формування гідрологічного режиму вчені, через значну кількість локальних географічних особливостей, використовують максимально узагальнені параметри, що здатні відобразити лише фундаментальні принципи функціонування системи. Таким чином, ідентифікація стійких закономірностей у межах подібних багатофакторних взаємозв'язків стає реальною виключно завдяки застосуванню апарату математичної статистики [5, 7].

Попри зазначені специфічні особливості, ключовим завданням гідрологічних розрахунків залишається встановлення кількісних показників стоку із заданою ймовірністю їх перевищення. Вирішення цієї задачі потребує обґрунтованого вибору теоретичного закону розподілу ймовірностей, який би максимально точно апроксимував емпіричні дані спостережень та базувався на достовірних статистичних характеристиках, необхідних для прикладного інженерного використання. Світова гідрологічна практика свідчить, що найбільш ефективними для оцінки стоку є моделі, які описуються обмеженим числом параметрів — зазвичай двома або трьома, серед яких основними є математичне сподівання, коефіцієнт варіації та коефіцієнт асиметрії.

У сучасній гідрологічній практиці для обчислення статистичних параметрів часових рядів найширшого розповсюдження набув метод моментів, сутність якого полягає у встановленні рівності між теоретичними моментами розподілу та їхніми емпіричними аналогами, розрахованими на основі наявної

вибірки даних, із подальшим розв'язанням системи рівнянь щодо шуканих характеристик [5, 12].

Метод найбільшої правдоподібності ґрунтується на пошуку таких значень параметрів розподілу, які максимізують функцію правдоподібності, що відображає ймовірність отримання конкретної вибірки спостережень. Застосування цього підходу є найбільш доцільним під час використання трипараметричного гамма-розподілу для визначення статистичних характеристик, при цьому за умови, коли коефіцієнт варіації значно перевищує нуль, результати розрахунків методами найбільшої правдоподібності та моментів виявляються практично ідентичними.

Для оцінки статистичних параметрів часових рядів стоку в басейні р. Збруч, а саме для визначення середнього значення, коефіцієнта варіації та асиметрії, а також їх співвідношення були використані обидва методи: моментів та найбільшої правдоподібності [6]. Для порівняння були визначені статистичні характеристики за різні часові інтервали: 1961-2020 рр., 1961-1990 рр. та 1991-2020 рр., що наведені у табл. 3.1.

В басейні р. Збруч – м. Волочиськ ($F=712 \text{ км}^2$) за весь досліджуваний період похибка складає 4,9 %, що не перевищує допустиму для визначення норми стоку, при середньому багаторічному значенні стоку $4,25 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$, коефіцієнти варіації 0,374-0,378 і асиметрії 0,237-0,281 та, відповідно, їх співвідношення 0,6-0,7. При цьому за період кліматичної норми 1961-1990 рр. маємо похибку 6,6 %, яка також не перевищує допустиму, але середнє багаторічне значення стоку на 10% більше і становить $4,67 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$, коефіцієнти варіації майже такі ж 0,350-0,362, а от коефіцієнт асиметрії майже вдвічі більші 0,462-0,558 та, відповідно, їх співвідношення вже 1,3-1,5. У сучасний період 1991-2020 рр. ситуація дзеркально інша: похибка 7,0 % (в межах допустимої), середнє багаторічне значення стоку на 10% менше ніж за весь досліджуваний період і становить $3,82 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$, коефіцієнти варіації майже такі ж 0,371-0,384, а от коефіцієнт асиметрії майже вдвічі менші і мають від'ємні значення $-0,83$ - $-0,340$ та, відповідно, їх співвідношення вже $-0,9$ - $-1,3$.

Таблиця 3.1

**Статистичні характеристики часових рядів спостереження за стоком в басейні р. Збруч
за періоди 1961-2020 рр., 1961-1990 рр. та 1991-2020 рр.**

№ за\п	Періоди спостереження	F, км²	n, років	Q _m , м³/с	Метод моментів				Метод найбільшої правдоподібності			q _m , л/(с·км²)	σq
					C _v	C _s	r(1)	C _s /C _v	C _v	C _s	C _s /C _v		
81232. р. Збруч – м. Волочиськ.*													
1	1961-2020	712	60	3,03	0,374	0,237	0,63	0,6	0,378	0,281	0,7	4,25	4,9
2	1961-1990	712	30	3,33	0,350	0,462	0,584	1,3	0,362	0,558	1,5	4,67	6,6
3	1991-2020	712	30	2,72	0,371	-0,340	0,64	-0,9	0,384	-0,183	-0,5	3,82	7,0
81236. р.Збруч - с.Завалля.*													
1	1961-2020	3240	60	13,3	0,393	0,309	0,69	0,8	0,398	0,352	0,9	4,10	5,1
2	1961-1990	3240	30	12,8	0,330	0,730	0,484	2,2	0,342	0,889	2,6	3,96	6,2
3	1991-2020	3240	30	13,7	0,438	0,044	0,781	0,1	0,454	0,124	0,3	4,24	8,3

В басейні р. Збруч – с. Завалля ($F=3240 \text{ км}^2$) за весь досліджуваний період похибка складає 5,1 %, що не перевищує допустиму для визначення норми стоку, при середньому багаторічному значенні стоку $4,10 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$, коефіцієнти варіації 0,393-0,398 і асиметрії 0,309-0,352 та, відповідно, їх співвідношення 0,8-0,9. За період кліматичної норми 1961-1990 рр. маємо похибку 6,2 %, яка також не перевищує допустиму, але середнє багаторічне значення стоку на 4% менше і становить $3,96 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$, коефіцієнти варіації майже такі ж 0,330-0,342, а коефіцієнт асиметрії 0,730-0,889 та, відповідно, їх співвідношення вже 2,2-2,6. У сучасний період 1991-2020 рр. ситуація дзеркально інша: похибка 8,3 % (в межах допустимої), середнє багаторічне значення стоку на 4% більше ніж за весь досліджуваний період і становить $4,24 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$, коефіцієнти варіації майже такі ж 0,438-0,454, а коефіцієнт асиметрії 0,044-0,124 та, відповідно, їх співвідношення вже 0,1-0,3.

3.4 Порівняльний аналіз зміни внутрішньорічного розподілу стоку в басейні р. Збруч за досліджуваний період

Внутрішньорічний розподіл річкового стоку є одним із показників змін в гідрологічному режимі на виклики сучасних кліматичних змін. Для річок басейну Дністра, до яких належить і Збруч, характерною ознакою є висока нерівномірність об'ємів стоку як за сезонами, так і впродовж окремих місяців року. Ця нерівномірність зумовлена специфікою живлення річки, де основну роль відіграють атмосферні опади у вигляді дощу та снігу, а також підземне живлення, частка якого є досить суттєвою завдяки карстовим процесам на Поділлі. Традиційно в природному гідрологічному режимі р. Збруч чітко виділялися високе весняне водопілля, спричинене таненням снігу, відносно стабільна літньо-осіння межень, що періодично переривалася дощовими паводками, та низька зимова межень. Проте активне зміщення термічного режиму в бік

потепління, часті зимові відлиги та зміна структури опадів (зменшення частки твердих опадів і зростання інтенсивності злив) підвищують ризики до суттєвих змін у гідрографах стоку.

Аналіз динаміки гідрологічних характеристик у межах річного циклу дає змогу оцінити, як саме глобальні кліматичні тенденції трансформуються на локальному рівні конкретного річкового басейну. Трансформація внутрішньорічного розподілу стоку має не лише фундаментальне наукове, а й вагоме практичне значення, оскільки від сезонної доступності водних ресурсів залежить стабільність функціонування житлово-комунального господарства, аграрного сектору та збереження екосистемного балансу регіону. Для детального виявлення цих тенденцій та оцінки ступеня трансформації водного режиму р. Збруч було виконано порівняльний аналіз внутрішньорічного розподілу стоку за два послідовні тридцятирічні періоди, а також узагальнено часові закономірності за весь досліджуваний період спостережень.

Результати узагальнень середньомісячного стоку та за сезонами за весь досліджуваний період та за періоди кліматичної норми 1961–1990 рр. та сучасний 1991–2020 рр. наведені у табл. 3.2 та на рис. 3.5-3.6.

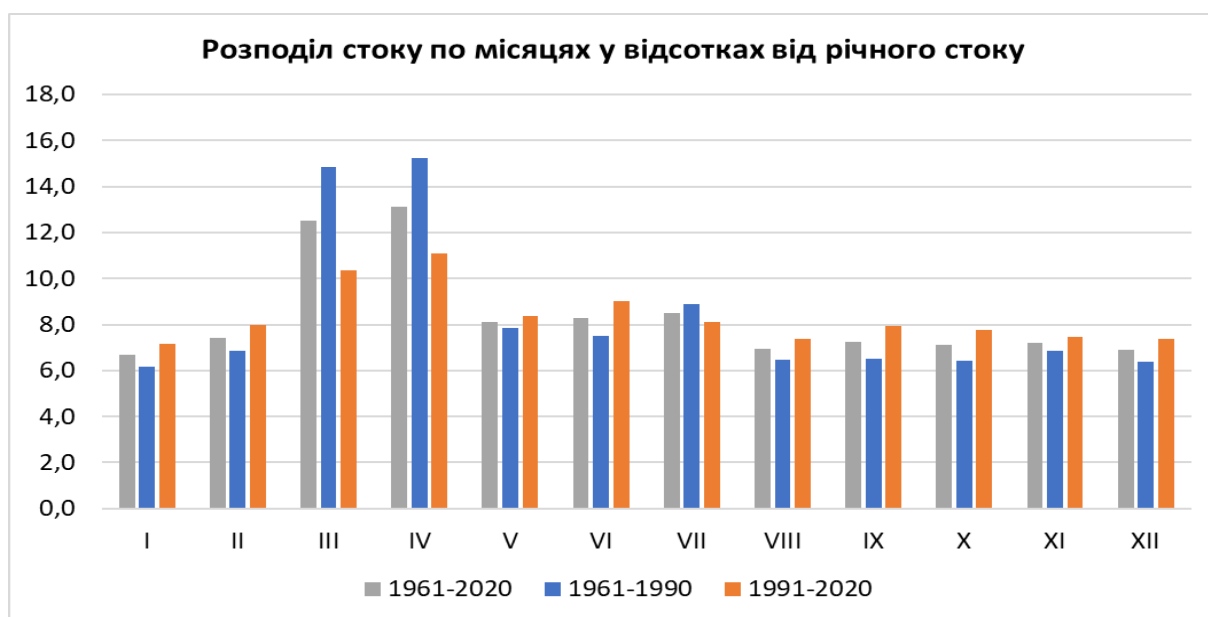


Рис. 3.5. Внутрішньорічний розподіл стоку р. Збруч – с. Завалля, у % від річного стоку

Таблиця 3.2

**Внутрішньорічний розподіл стоку по місяцях та сезонах в басейні р. Збруч – с. Завалля
за період дослідження 1961-2020 рр.**

Періоди / Місяці	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<i>в м³/с</i>												
1961-2020	10,6	11,8	20,0	20,9	12,9	13,2	13,5	11,1	11,5	11,4	11,5	11,0
1961-1990	9,47	10,5	22,8	23,5	12,1	11,5	13,7	9,94	10,0	9,91	10,6	9,84
1991-2020	11,8	13,1	17,1	18,3	13,8	14,8	13,4	12,2	13,1	12,8	12,3	12,2
<i>у відсотках, %</i>												
1961-2020	6,7	7,4	12,5	13,1	8,1	8,3	8,5	6,9	7,2	7,1	7,2	6,9
1961-1990	6,2	6,8	14,8	15,3	7,8	7,5	8,9	6,5	6,5	6,4	6,9	6,4
1991-2020	7,2	8,0	10,4	11,1	8,4	9,0	8,1	7,4	7,9	7,8	7,5	7,4

Продовження таблиці 3.2

Періоди / Місяці	Весна	Літо	Осінь	Зима
<i>в м³/с</i>				
1961-2020	53,8	37,8	34,3	33,5
1961-1990	58,4	35,2	30,5	29,8
1991-2020	49,2	40,4	38,2	37,1
<i>у відсотках, %</i>				
1961-2020	33,7	23,7	21,5	21,0
1961-1990	37,9	22,9	19,8	19,4
1991-2020	29,8	24,5	23,2	22,5

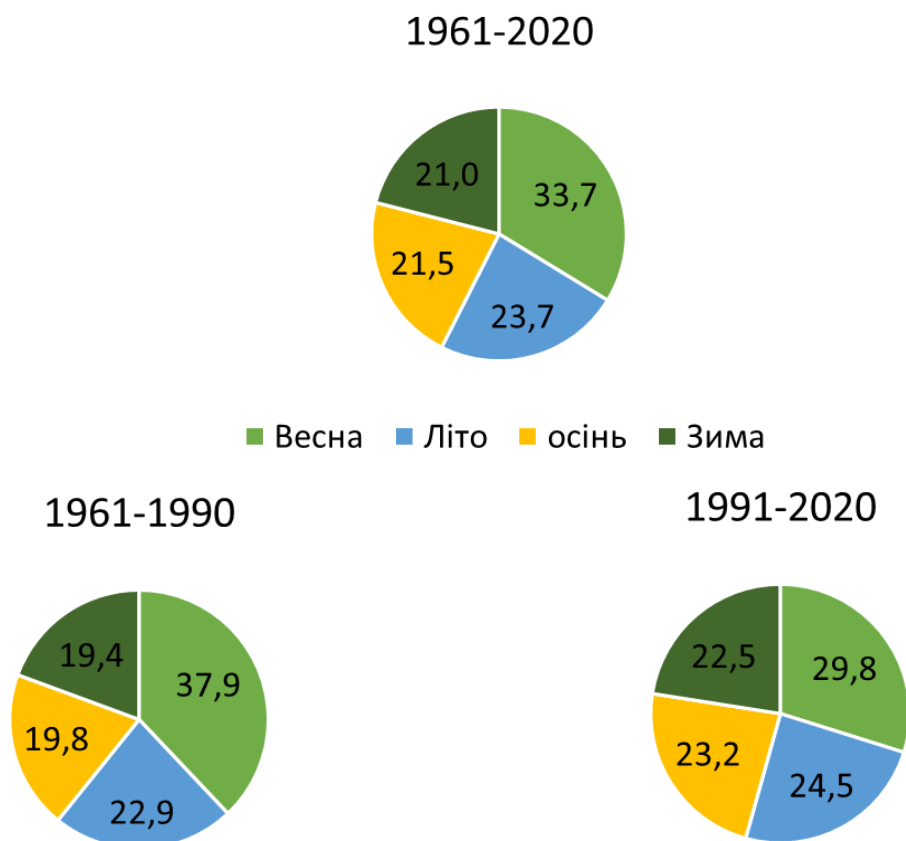


Рис. 3.6. Розподіл стоку по сезонах у відсотках від річного стоку в басейні р. Збруч – с. Завалля за досліджуваний період та 1961-1990 рр., 1991-2020 рр.

Найбільша частка стоку як у період кліматичної норми, так і у сучасний період припадає на березень і квітень (рис. 3.5). За період весняного водопілля формувалося в середньому 40,9 % стоку від річного стоку, але у період 1961-1990 рр. ця частка була 46,3 %, а у сучасний період суттєво зменшилась до 25,4 %.

Детальний аналіз величин середньомісячних витрат води свідчить про значні зміни при порівнянні двох 30-річних періодів (табл. 3.2). Так, у період кліматичної норми 1961-1990 рр. у порівнянні з сучасним періодом маємо більший стік у березні, квітні майже на 5 м³/с. Проте у сучасний період маємо вирівнювання стоку, що призвело до зменшення величин у ці місяці [16].

Відповідно, порівнюючи сезонний стік (табл. 3.2, рис. 3.6) маємо, що весняний стік у сучасний період складає 29,8 %, тобто на 8,1 % менше ніж за

період 1961-1990 рр. У всі інші сезони є відповідне збільшення частки стоку – літо на +1,6%, осінь на +3,4% та зима на +3,1%.

Результати розрахунків та порівняння середньомісячних і сезонних об'ємів стоку між двома розглянутими кліматичними періодами свідчать про наявність чітко виражених тенденцій до перерозподілу водності впродовж року [16].

Насамперед, порівняльний аналіз першого та другого періодів фіксує суттєве нівелювання весняного водопілля. Якщо у перший кліматичний період основна частка річного стоку проходила у березні–квітні, то у другий період спостерігається розпластування цього піку та його зміщення на зимові місяці (січень–лютий) через часті відлиги та формування тало-дощових паводків. В цілому за весь досліджуваний період спостерігається чітка тенденція до вирівнювання стоку впродовж року, де зменшення водності у весняний період частково компенсується збільшенням стоку в зимові місяці, що детально відображено у наведених рис. 3.5 та рис. 3.6.

Результатом виконаних розрахунків та досліджень річкового стоку були визначені шари стоку за досліджуваний період та два 30-річні періоди для всього водозбору р.Збруч, які у подальшому будуть використані при розрахунку водного балансу досліджуваного басейну .

3.5 Оцінка динаміки метеорологічних складових водного балансу за досліджуваний період в басейні р. Збруч

Аналіз метеорологічних чинників формує уявлення про умови надходження і витрачання вологи на водозборі, тим самим контролюючи структуру водного балансу річкового басейну. Як вже зазначалося вище (див. п. 3.1) в межах досліджуваного басейну р. Збруч відсутні стаціонарні пункти спостереження за метеорологічними даними. Тому для дослідження обрані такі метеостанції як Кременець, Тернопіль і Чортків в Тернопільській області та

Хмельницький і Кам'янець-Подільський в Хмельницькій області. На рис. 3.1 показані межі впливу на водозбір кожної з метеостанцій, що дало змогу більш точно встановити величину опадів та випаровування для басейну р. Збруч у порівнянні із звичайним осередненням.

Для оцінки змін метеорологічних складових водного балансу були взяті зведені дані фахівцями ЦГО ім. Бориса Срезневського за період кліматичної норми 1961-1990 рр. та сучасний період 1991-2020 рр.

На рис. 3.7 можемо бачити зміни у величинах місячних сум опадів за два періоди при незначній зміні середньої багаторічної річної суми опадів 641 мм за сучасний період у порівнянні із попереднім періодом – 650 мм.

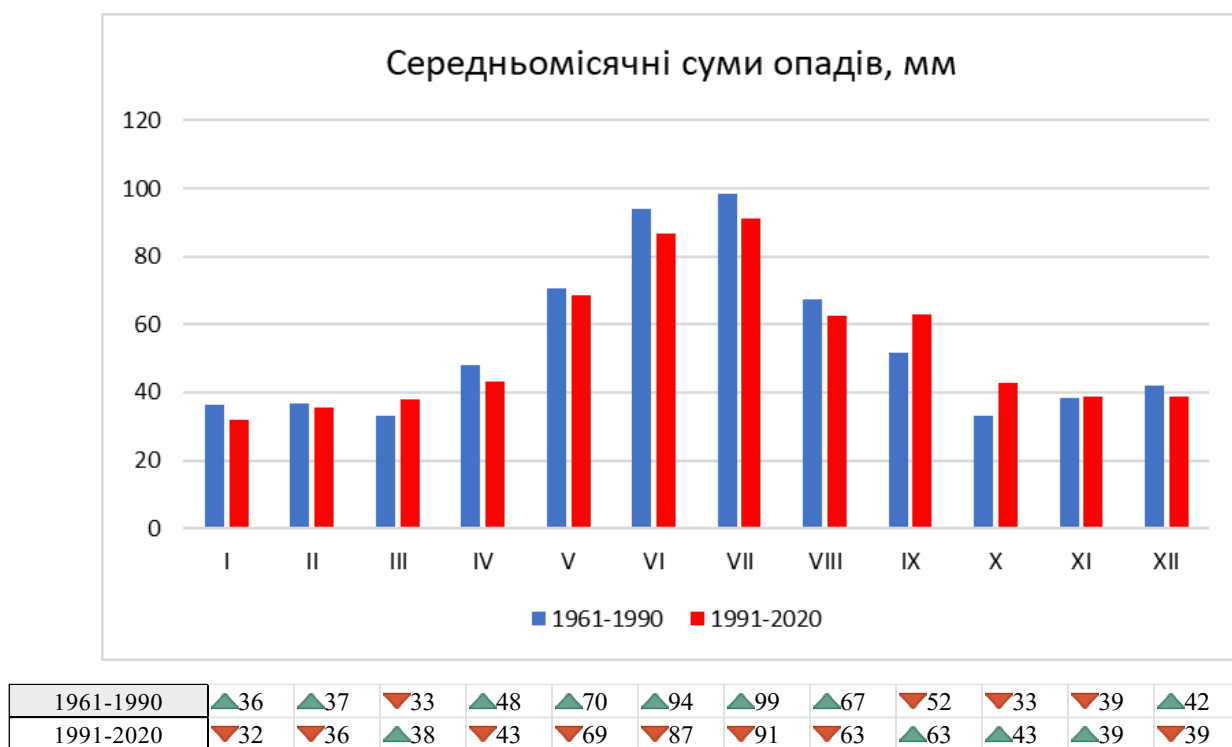


Рис. 3.7. Величини місячних сум опадів на водозборі р. Збруч осереднені за період 1961-1990 рр. та 1991-2020 рр.

Більш детальний аналіз змін у середніх багаторічних величинах місячних сум опадів за два розглянуті періоди показує:

- збільшення опадів у сучасний період в березні (+5 мм), вересні (+11 мм) та жовтні (+10 мм);

- зменшення опадів у сучасний період у грудні, січні та лютому на 1-4 мм, у квітні, травні на 1-5 мм, у червні-серпні на 4-8 мм;
- незмінною залишилась сума опадів за листопад — 39 мм.

При цьому на рис. 3.8 маємо зміни у величинах середньомісячних температур повітря за розглянути два періоди, де середньорічна температура повітря збільшилась до $+8,4^{\circ}\text{C}$ у сучасний період з $+7,3^{\circ}\text{C}$ за період кліматичної норми 1961-1990 рр., тобто середньомісячні температури збільшилися на $+0,5-2,0^{\circ}\text{C}$. При цьому найбільше збільшення середньомісячних температур відбулося у зимові та літні місяці.

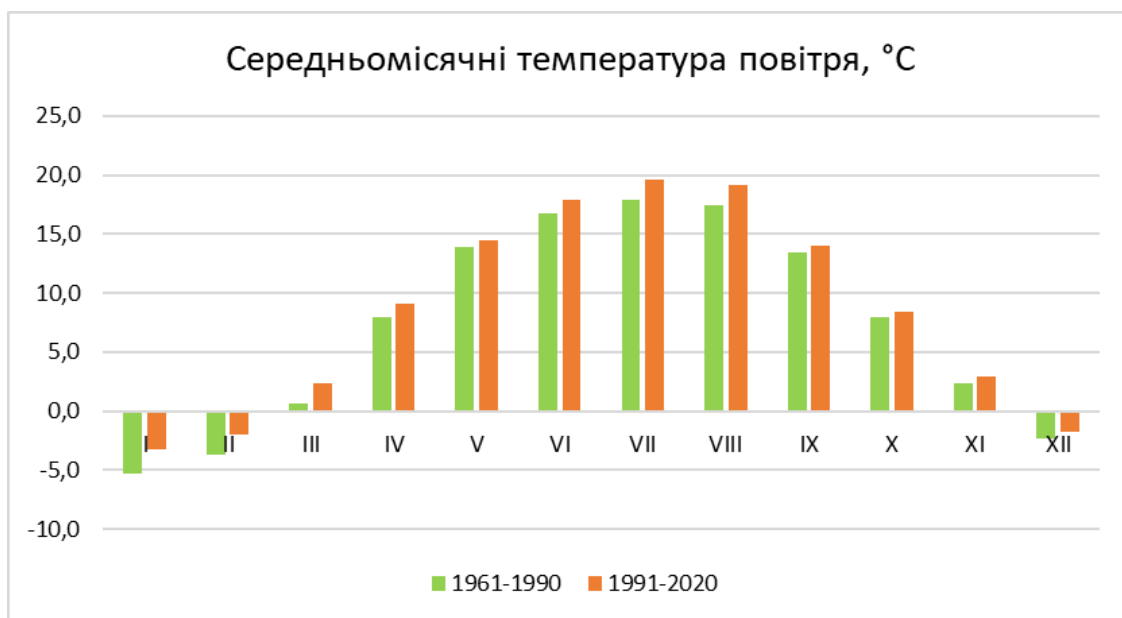


Рис. 3.8. Величини місячних температур повітря на водозборі р. Збруч осереднені за період 1961-1990 рр. та 1991-2020 рр.

І як наслідок, маємо збільшення середньомісячних величин відносної вологості повітря на 0,2-1,2 мб у порівнянні із попереднім періодом кліматичної норми.

Збільшення середньомісячних температур повітря та відносної вологості вплине на зміну величини сумарного випаровування, як складової водного балансу.

3.6 Розрахунок водного балансу за місячні проміжки часу, сезони, теплий і холодний періоди року та за гідрологічний рік в басейні р. Збруч за два досліджувані періоди

Перш ніж розрахувати нев'язку водного балансу, було виконані інженерні розрахунки за методом Константинова для визначення сумарного випаровування опираючись на дані багаторічних значень середньомісячної температура повітря ($t^{\circ}\text{C}$) та середньомісячної абсолютної вологості повітря (e , мб), до яких були внесені інерційні поправки. Результати визначення наведені у табл. 3.3 за два досліджувані періоди.

Як бачимо, величина сумарного випаровування збільшилась з 550 мм на рік за період кліматичної норми 1961-1990 рр. до 571 мм у сучасний період 1991-2020 рр.

На рис. 3.9 наведені порівняльні графіки елементів водного балансу для басейну р. Збруч за два досліджувані періоди.

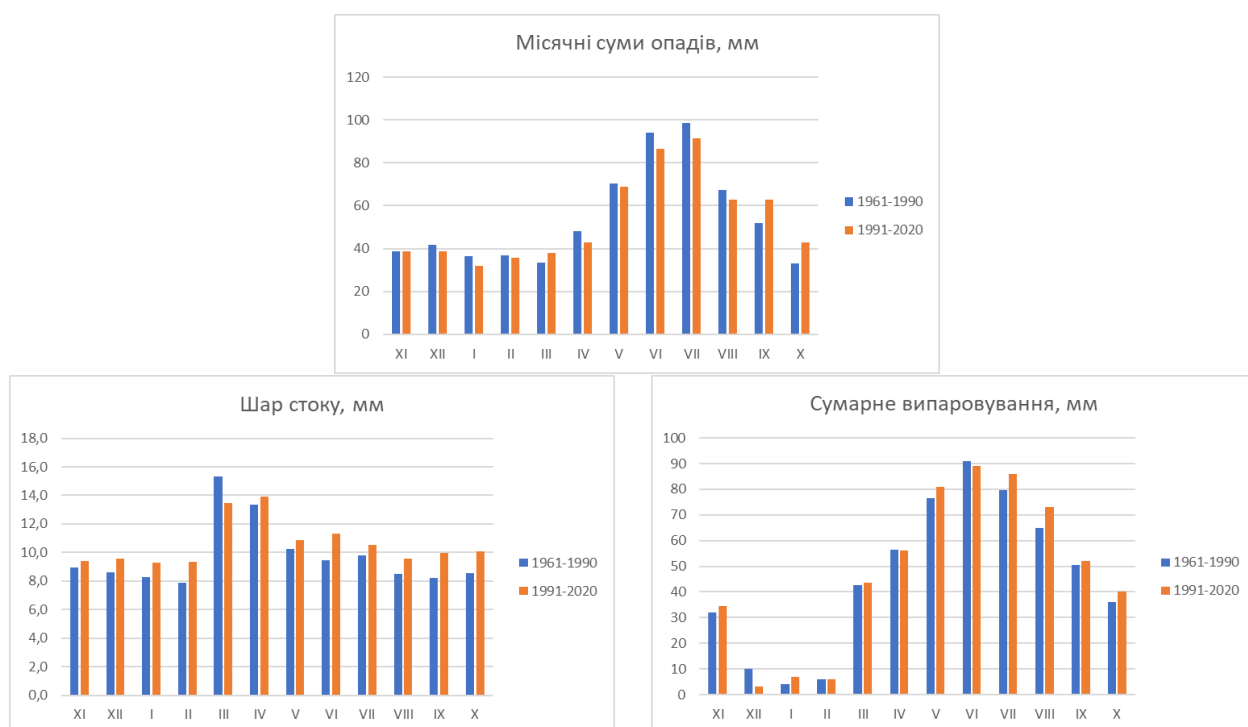


Рис. 3.9. Зміни елементів водного балансу в басейні р. Збруч за два досліджувані періоди 1961-1990 рр. та 1991-2020 рр.

Таблиця 3.3

Розрахунок сумарного випаровування за методом Константинова О.Р. для басейну р. Збруч

А) за період 1961-1990 рр.

Основні параметри	Місяця											
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Багаторічне значення середньомісячної температура повітря, $t^{\circ}\text{C}$	2,3	-2,4	-5,3	-3,7	0,7	8,0	13,9	16,8	18,0	17,4	13,5	7,9
Багаторічне значення середньомісячної абсолютної вологості повітря, e , мб	6,5	4,8	3,9	4,2	5,3	7,5	10,8	13,8	15,1	14,6	11,7	8,7
Інерційна поправка на температуру повітря $^{\circ}\text{C}$, (Δt)	-6				1,3	1,6	3,7	2,6	-2,5	-7,8	-10,4	-9
Інерційна поправка на абсолютну вологість повітря, $(\Delta e, \text{мб})$	-1,7				0,4	0,8	2,5	1,7	-2	-4,2	-3,3	-3,5
Виправлена температура повітря, $(t^{\circ} + \Delta t)$	-3,7				2,0	9,6	17,6	19,4	15,5	9,6	3,1	-1,1
Виправлене значення вологості повітря, $(e + \Delta t)$	4,8				5,7	8,3	13,3	15,5	13,1	10,4	8,4	5,2
Сумарне випаровування $(E, \text{мм})$	32	10	4	6	42,5	56,5	76,5	91	79,5	65	50,5	36

Б) за період 1991-2020 рр.

Основні параметри	Місяця											
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Багаторічне значення середньомісячної температура повітря, $t^{\circ}\text{C}$	3,0	-1,8	-3,2	-2,0	2,3	9,1	14,5	17,9	19,6	19,2	14,0	8,4
Багаторічне значення середньомісячної абсолютної вологості повітря, e , мб	6,8	5,0	4,4	4,7	5,6	7,7	11,1	14,5	16,2	15,4	12,0	9,1
Інерційна поправка на температуру повітря $^{\circ}\text{C}$, (Δt)	-5,9				1,4	1,65	3,7	2,5	-2	-6,6	-10,4	-9
Інерційна поправка на абсолютну вологість повітря, $(\Delta e, \text{мб})$	-1,8				0,4	0,8	2,6	1,4	-1,4	-3,6	-3,3	-3,5
Виправлена температура повітря, $(t^{\circ} + \Delta t)$	-2,9				3,7	10,8	18,2	20,4	17,6	12,6	3,6	-0,6
Виправлене значення вологості повітря, $(e + \Delta t)$	5,1				6,0	8,5	13,7	15,9	14,8	11,8	8,7	5,6
Сумарне випаровування $(E, \text{мм})$	34,5	3	7	6	43,5	56	81	89	86	73	52	40

Для комплексної оцінки трансформації структури зволоження та стоку в басейні річки Збруч було виконано детальний порівняльний аналіз елементів водного балансу за два послідовні тридцятирічні кліматичні періоди (табл. 3.4): базовий (1961–1990 рр.) та сучасний (1991–2020 рр.). Отримані розрахункові дані свідчать про чітку перебудову гідрологічного режиму водозбору, яка проявляється як у зміні загальних річних та сезонних величин, так і у значній трансформації внутрішньорічного (місячного) розподілу атмосферних опадів (P), річкового стоку (R) та сумарного випаровування (E).

Аналіз багаторічної динаміки інтегральних показників за гідрологічний рік фіксує тенденцію до незначного зменшення загальної кількості атмосферних опадів на тлі одночасного зростання річкового стоку та сумарного випаровування. Зокрема, у базовий період (1961–1990 рр.) середня річна сума опадів становила 650 мм, тоді як у сучасний період (1991–2020 рр.) вона скоротилася до 641 мм (зменшення на 9 мм, або близько 1,4%). Водночас шари річного стоку продемонстрували протилежну динаміку, збільшившись із 117 мм у першому періоді до 127 мм у другому (приріст становив 10 мм, або 8,5%). Найбільш інтенсивне зростання зафіксовано для показників сумарного випаровування, розрахованого за методом Константинова: річна величина евапотранспірації збільшилася з 550 мм до 571 мм (на 21 мм, або 3,8%), що безпосередньо віддзеркалює регіональні тенденції до підвищення середньорічної температури повітря. Збільшення витратних складових балансу (стоку та випаровування) на фоні зменшення опадів зумовило відповідне зростання річної нев'язки водного балансу з $-2,5$ мм до $-9,0$ мм, що, проте, повністю вкладається в межі допустимих гідрологічних похибок [7, 16].

Детальний аналіз водного балансу за сезони, теплі та холодний періоди дозволяє виявити внутрішні механізми цього перерозподілу вологи (табл. 3.5). Протягом теплого періоду року (травень–жовтень) сума опадів в обох кліматичних періодах залишилася незмінною і становила 415 мм. Проте структура витрат у цей сезон зазнала суттєвих змін. Якщо у 1961–1990 рр. стік за теплий період становив 55 мм, а випаровування — 399 мм, то в сучасний період

Таблиця 3.4

Значення елементів водного балансу за місячні проміжки часу в басейні р. Збруч та нев'язка розрахунку

А) за період 1961-1990 рр.

Елементи водного балансу	Місяця											
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
опаді Р, мм	39	42	36	37	33	48	70	94	99	67	52	33
річковий стік R, мм	8,9	8,6	8,3	7,9	15	13	10	9,4	9,8	8,5	8,2	8,6
сумарне випаровування Е, мм	32	10	4	6	42,5	56,5	76,5	91	79,5	65	50,5	36
нев'язка розрахунку водного балансу η, мм	-2,4	23,2	24,1	23,1	-24,5	-21,8	-16,3	-6,3	9,3	-6,3	-7,0	-11,5

Б) за період 1991-2020 рр.

Елементи водного балансу	Місяця											
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
опаді Р, мм	39	39	32	36	38	43	69	87	91	63	63	43
річковий стік R, мм	9,4	9,6	9,3	9,3	13	14	11	11	11	9,6	9,9	10
сумарне випаровування Е, мм	34,5	3	7	6	43,5	56	81	89	86	73	52	40
нев'язка розрахунку водного балансу η, мм	-5,2	26,2	15,6	20,2	-19,1	-26,9	-23,2	-13,6	-5,2	-19,9	0,8	-7,1

Таблиця 3.5

Значення елементів водного балансу за сезонами, за теплий і холодний періоди року та за гідрологічний рік в басейні р. Збруч та нев'язка розрахунку

А) за період 1961-1990 рр.

Елементи водного балансу	Водний баланс по сезонах				Водний баланс за періоди		Водний баланс за гідрологічний рік XI- X
	Осінь IX-XI	Зима XII-II	Весна III-V	Літо VI-VIII	Холодний XI- IV	Теплий V- X	
опадів Р, мм	123	115	152	260	235	415	650
річковий стік R, мм	26	25	39	28	62	55	117
сумарне випаровування Е, мм	119	20	176	236	151	399	550
нев'язка розрахунку водного балансу η, мм	-20,9	70,3	-62,6	-3,3	21,6	-38,1	-17

Б) за період 1991-2020 рр.

Елементи водного балансу	Водний баланс по сезонах				Водний баланс за періоди		Водний баланс за гідрологічний рік XI- X
	Осінь IX-XI	Зима XII-II	Весна III-V	Літо VI-VIII	Холодний XI- IV	Теплий V- X	
опадів Р, мм	144	106	149	241	226	415	641
річковий стік R, мм	29	28	38	31	65	62	127
сумарне випаровування Е, мм	127	16	181	248	150	421	571
нев'язка розрахунку водного балансу η, мм	-11,5	62,0	-69,2	-38,8	10,8	-68,3	-58

(1991–2020 рр.) зафіксовано зростання як шару стоку (до 62 мм), так і випаровування (до 421 мм). Це вказує на те, що літньо-осінні опади стали більш інтенсивними, але короткочасними, а підвищення температури повітря зумовило швидке повернення вологи в атмосферу.

Особливий інтерес викликає динаміка елементів балансу у розрізі класичних гідрологічних сезонів. В осінній період (вересень–листопад) у сучасний період спостерігається суттєве зростання кількості опадів — з 123 мм до 144 мм, що зумовило збільшення як стоку (з 26 мм до 29 мм), так і випаровування (з 119 мм до 127 мм). Зимовий сезон (грудень–лютий) характеризується зменшенням суми опадів зі 115 мм до 106 мм. Попри це, шар зимового стоку збільшився із 25 мм до 28 мм. Цей парадокс обґрунтовується деградацією стійкого снігового покриву та частими зимовими відлигами: волога, яка раніше акумулювалася на водозборі у вигляді снігу до весни, тепер трансформується у безпосередній стік у зимові місяці.

Цей процес безпосередньо вплинув на весняний сезон (березень–травень), де зафіксовано зниження суми опадів (з 152 мм до 149 мм) та зменшення шару весняного стоку з 39 мм до 38 мм. Головна трансформація помітна при аналізі помісячного розподілу стоку весни: у базовому періоді чіткий пік водопілля припадав на березень (15 мм), після чого відбувався спад у квітні (13 мм) та травні (10 мм). У сучасний період (1991–2020 рр.) відбувається розпластування весняного максимуму: у березні стік зменшився до 13 мм, тоді як у квітні дещо зріс до 14 мм, а у травні стабілізувався на позначці 11 мм. Це свідчить про нівелювання класичного весняного водопілля в басейні Збруча та зміщення стокоформуючих процесів на більш ранні терміни.

Літній сезон (червень–серпень) демонструє аналогічні тенденції кліматичної перебудови. Кількість літніх опадів зменшилася з 260 мм у першому періоді до 241 мм у другому. При цьому сумарне випаровування інтенсифікувалося з 236 мм до 248 мм. Така комбінація факторів (менше опадів і більше випаровування) зазвичай мала б призвести до критичного виснаження стоку, проте розрахунки фіксують його зростання з 28 мм до 31 мм. Це явище

може бути пов'язане із дедалі більшою роллю підземного живлення річки Збруч, яке підтримує водність у маловодні місяці за рахунок акумуляції вологи в попередні вологі періоди (зокрема, за рахунок збільшення опадів восени), а також через зростання частоти зливових паводків, які дають швидкий короткочасний приріст поверхневого стоку, що детально підтверджується порівняльним аналізом помісячних розрахункових балансів.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне гідрологічне дослідження багаторічної динаміки та трансформації елементів водного балансу і характеристик річного стоку басейну річки Збруч в умовах інтенсивних кліматичних змін. На основі проведеного аналізу, математико-статистичних розрахунків та ГІС-моделювання сформульовано такі основні висновки:

1. Басейн річки Збруч, розташований у межах Подільської височини, володіє специфічними фізико-географічними та геологічними умовами формування стоку. Наявність тріщинуватих неогенових вапняків Товтрової гряди (Медоборів) та активний розвиток карстових процесів виступають потужним природним регулятором річкового режиму. Це зумовлює аномально високу частку підземного живлення Збруча порівняно з іншими лівими притоками Середнього Дністра, що забезпечує підвищену гідрологічну стійкість русла під час глибоких меженних періодів.
2. Аналіз метеорологічних чинників за два послідовні тридцятирічні кліматичні періоди (базовий 1961–1990 рр. та сучасний 1991–2020 рр.) підтвердив регіональні прояви глобального потепління. Зафіксовано суттєве підвищення середньорічної температури повітря (на $+1.0 - +1.2^{\circ}\text{C}$), що найбільш виражено в зимові та літні місяці. Загальна річна сума атмосферних опадів зазнала незначного зниження — з 650 мм у першому періоді до 641 мм у сучасному (зменшення на 1,4%), проте кардинально трансформувалася їхня внутрішньорічна та генетична структура.
3. Розрахунок сумарного випаровування за методом Константинова О.Р. продемонстрував інтенсифікацію видаткових статей водного балансу басейну під впливом термічного ресурсу. Річна величина евапотранспірації збільшилася з 550 мм (1961–1990 рр.) до 571 мм (1991–2020 рр.), тобто на 3.8%. Найбільший приріст втрат на випаровування зафіксовано в літній

період (червень—серпень), що посилює ризики виникнення «гідрологічних посух» на тлі одночасного скорочення літніх опадів на 19 мм.

4. Всупереч загальному тренду зменшення опадів та зростання випаровування, інтегральний шар річного стоку річки Збруч за результатами балансових розрахунків збільшився зі 117 мм у першому періоді до 127 мм у сучасному (приріст 8,5%). Цей гідрологічний парадокс детально обґрунтовується перебудовою фазового складу стоку та активізацією підземного дренажу басейну, чому також сприяло суттєве збільшення опадів в осінній період (з 123 до 144 мм), які наситили водоносні горизонти. Нев'язки зведених воднобалансових рівнянь для обох періодів перебувають у межах нормативних похибок (до -9 мм), що доводить точність та адекватність застосованої методичної схеми.
5. Порівняльний аналіз внутрішньорічного розподілу водного балансу виявив глибоку трансформацію фаз гідрологічного режиму річки. Через теплі зими та часті відлиги сніговий покрив втратив акумуляційну роль, внаслідок чого класичне весняне водопілля березневого типу практично нівелювалося (стік березня знизився з 15 до 13 мм), а паводкові хвилі змістилися на зимовий період (шар зимового стоку зріс з 25 до 28 мм). Відбулося загальне вирівнювання (розпластування) гідрографа стоку впродовж року.
6. Високе антропогенне навантаження на басейн Збруча, що проявляється у надвисокій розораності плато (до 75%) та наявності розвиненої мережі ставків і малих ГЕС, посилює кліматичну нестабільність. Штучне регулювання русла збільшує площу додаткового випаровування, що у літні місяці загострює екологічні проблеми малих приток. Отримані кількісні параметри елементів водного балансу та виявлені гідрокліматичні тенденції є практичною основою для перегляду лімітів водокористування, управління меженням стоком та розробки Планів управління річковим басейном (ПУРБ) Дністра.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Балабух В. О., Лавріненко О. В. Зміна термічного режиму та режиму опадів в Україні в умовах глобального потепління. *Наукові праці Українського гідрометеорологічного інституту*. 2020. Вип. 268. С. 12–25.
2. Вишневський В.І. Річки і водойми України. Стан і використання: Монографія. К.: Віпол, 2000. 376 с.
3. Вишневський В.І., Косовець О.О. Гідрологічні характеристики річок України. Київ : НікаЦентр, 2003. 324 с.
4. Гідрологічні і водно-балансові розрахунки : навч. посіб. / за ред. Н. Г. Галущенко. Київ : Вища школа, 1987. 248 с.
5. Гідрологічні розрахунки: підручник / Є.Д. Гопченко, Н.С. Лобода, В.А. Овчарук. Одеса: ТЕС, 2014. 484 с
6. Горбачова Т. О. Оцінка стаціонарності та однорідності багаторічних рядів річкового стоку в умовах змін клімату. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 2 (53). С. 45–54.
7. Гребінь В. В. *Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз)*. Київ : Ніка-Центр, 2010. 316 с.
8. Гребінь В. В., Яцюк М. В., Чунарьов О. В. Водогосподарське районування території України: критерії та порядок виділення водогосподарських ділянок. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2013. Т. 3(30). С. 6-14.
9. Державний водний кадастр: облік поверхневих водних об'єктів. URL: <https://geoportal.davr.gov.ua/>
10. Забокрицька М. Р., Хільчевський В. К. Водні об'єкти та якість води басейну річки Збруч : монографія. Луцьк : Вежа-Друк, 2021. 184 с.
11. Кучерко Г. М. *Оцінка та прогнозування водних ресурсів річок лівобережжя Середнього Дністра в умовах змін клімату : дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.07*. Чернівці : ЧНУ ім. Юрія Федьковича, 2022. 215 с.

12. Лобода Н.С. Розрахунок та узагальнення характеристик річного стоку річок України в умовах антропогенного впливу. Одеса. Екологія, 2005. 208 с.
13. Осадчий В. І., Барабаш М. Б. Динаміка змін температури повітря та опадів в Україні на рубежі XX і XXI століть. *Доповіді Національної академії наук України*. 2014. № 8. С. 98–104.
14. Офіційний сайт РОВР у Тернопільській області. URL: <https://rovрто.davr.gov.ua/>
15. Офіційний сайт РОВР у Хмельницькій області. URL: <https://rovrkhm.gov.ua/>
16. Пелех Д.С. Оцінка складових водного балансу басейну річки Збруч у сучасний період. Шевченківська весна – 2026: ГЕОГРАФІЯ: Збірник наукових праць XXII міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Київ : Видавництво «Наукова столиця», 2026. Випуск XXIII. С. 132-134.
17. Трофімова І. В. Просторово-часовий аналіз кліматичних змін на території Поділля. *Географічний часопис*. 2022. Том 34, № 1. С. 56–67.
18. Хільчевський В. К., Гребінь В. В. Гідрографічне районування території України як основа стратегічного управління водними ресурсами. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2017. № 1 (44). С. 6–16.
19. Швиденко А. К., Букша І. Ф. Кліматичні зміни та їхній вплив на водні й лісові екосистеми України. *Український географічний журнал*. 2021. № 3. С. 14–26.
20. European Environment Agency (EEA). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2024: An indicator-based report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. 212 p.
21. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp.