

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Лобода Н.С., Отченаш Н.Д.

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ГАЛУЗІ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ  
(ВОДНЕ ГОСПОДАРСТВО)

Конспект лекцій

Одеса  
Одеський державний екологічний університет  
2024

УДК 556.261.45.18

*Л 68*

**Лобода Н. С., Отченаш Н. Д.**

*Л 68* Вплив кліматичних змін на галузі економіки України (водне господарство): конспект лекцій. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2024. 123 с. ISBN 978-966-186-310-0

В конспекті розглянуто сучасні підходи до оцінки наслідків кліматичних змін у водному господарстві, описана модель “клімат-стік” для визначення природного та побутового стоку річок на основі метеорологічних даних, показано зміни кліматичних чинників формування стоку та поверхневих водних ресурсів України на початку XXI сторіччя та у майбутньому (за сценаріями глобального потепління).

Конспект лекцій призначений для професійної та практичної підготовки студентів рівня вищої освіти магістр за спеціальністю 103 «Науки про Землю» денної та заочної форм навчання.

УДК 556.261.45.18

*Рекомендовано методичною радою Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України як конспект лекцій (протокол №6 від 23.05. 2024 р.)*

ISBN 978-966-186-310-0

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Математичне моделювання стоку з річкових водозборів для його прогнозування в умовах змін клімату.....	6
2 Стохастичні моделі річного стоку у виді простого ланцюга Маркова.....	13
3 Атмосферна циркуляція над Україною та її вплив на гідрологічні процеси.....	19
4 Вплив змін клімату на льодовий режим річок.....	27
5 Прогнозування змін характеристик характеристик максимального талого та дощового стоку річок за моделлю Є.Д. Гопченка – В.А. Овчарук.....	33
6 Вплив змін клімату на гідрохімічний склад води та водні біоресурси.....	40
7 Гідрологічні посухи в умовах змін клімату.....	49
8 Теоретичні основи моделі “клімат-стік”.....	58
8.1 Теоретичні основи розрахунків характеристик річного стоку в природних умовах.....	58
8.2 Теоретичні основи розрахунків характеристик річного стоку в умовах водогосподарських перетворень.....	65
9 Блок розрахунків природного річного стоку за моделлю “клімат-стік”.....	70
9.1 Метод водно-теплового балансу.....	71
9.2 Теплоенергетичні ресурси клімату.....	76
9.3 Ресурси зволоження.....	78
9.4 Кліматичний стік.....	81
9.5 Оцінка впливу на норму річного стоку підстильної поверхні.....	82
9.6 Методика розрахунків характеристик річного стоку за моделлю “клімат-стік”.....	85
10 Блок розрахунків побутового стоку за моделлю клімат-стік. Функції антропогенного впливу.....	87
10.1 Обґрунтування стохастичної моделі побутового річного стоку при наявності штучних водойм.....	87
10.2 Обґрунтування стохастичної моделі побутового річного стоку при наявності зрошувальних меліорацій.....	89
10.3 Обґрунтування стохастичної моделі побутового річного стоку при наявності зрошувальних меліорацій за рахунок річки-донора.....	94
10.4 Обґрунтування стохастичної моделі побутового річного стоку при наявності осушувальних меліорацій.....	95
11 Моделювання характеристик природного та побутового річного	

стоку на базі імітаційної стохастичної моделі “клімат-стік” за даними кліматичних сценаріїв.....	103
12 Управління водними ресурсами в умовах змін клімату. Обґрунтування заходів по управлінню водними ресурсами на базі моделі “клімат-стік”.....	112
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	121

## ВСТУП

У Всесвітній доповіді організації об'єднаних націй про стан водних ресурсів відзначається, що у 2021 році 2 млрд. людей не мають прямого доступу до води. Україна є однією з найменш забезпечених водою європейських держав: на одного її мешканця припадає близько 4,98 тис. м<sup>3</sup> води на рік. В умовах змін клімату та зменшення водних ресурсів України останні “можуть стати головним лімітуючим фактором у розвитку і розміщенні продуктивних сил”. У рішенні Ради національної безпеки і оборони України від 30 липня 2021 року зазначається існування “високого ризику для водних об'єктів ... зумовленого значним забрудненням та виснаженістю, недостатністю адаптаційних можливостей водогосподарської галузі до негативних процесів зміни клімату,..” (Указ президента України від 13 серпня 2021 року № 357/2021). Зростання дефіциту води в Україні буде обумовлювати посилення водних обмежень, суттєве скорочення наявності води для використання, разом із збільшенням потреб у воді для іригації, енергетики, промисловості, житлово-комунального господарства разом із зростанням економічних втрат.

Підписання Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом (ЄС) і його державами-членами, з іншої сторони, яке відбулося у 2014 році, відкрило нові можливості розвитку нашої країни у різних сферах суспільного життя, включаючи сферу охорони довкілля. Однією з основних Директив ЄС є Водна Рамкова Директива (ВРД), головною задачею якої є забезпечення законодавчої бази для досягнення доброго статусу водних об'єктів на основі сучасних підходів до управління водними ресурсами. Директиви ЄС визначили “Національну стратегію екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату України на період до 2030 року” та “Стратегію розвитку водної політики України (Водна стратегія) на 2020-2050рр.”

Рішення поставлених задач забезпечується, насамперед, обґрунтованими прогнозами можливих змін водних ресурсів України у майбутньому на основі застосування кліматичних проєкцій, установлених за допомогою математичного моделювання.

## 1 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТОКУ З РІЧКОВИХ ВОДОЗБОРІВ ДЛЯ ЙОГО ПРОГНОЗУВАННЯ В УМОВАХ ЗМІН КЛІМАТУ

Водні ресурси визначають стан оточуючого середовища, вони пов'язані із соціальним положенням суспільства і здоров'ям людини. Використання водних ресурсів в Україні є одним з найбільш високих у світі й складає до 100 % техногенного перетворення поверхневих вод й до 10–20 % підземних. Зміни глобального клімату, які спостерігаються на протязі останніх десятиріч, обумовлюють й певні зміни водних ресурсів.

Поєднання змін кліматичних умов з існуючими водогосподарськими заходами може привести до перегляду стратегії розвитку промисловості, сільського господарства та природоохоронних заходів в Україні. **Зміни клімату впливають на формування природних (непорушених водогосподарською діяльністю) водних ресурсів та окремі складові водогосподарських балансів, які пов'язані із коливаннями клімату (випаровування з водної поверхні штучних водойм, показники дефіциту споживання води рослинами, характеристики зволоження ґрунтів, тощо).** В залежності від кліматичних умов змінюються ризики для людей та економіки в галузі водного господарства та стратегії адаптації (наприклад, визначення доцільності певних водогосподарських заходів та критичних меж їхнього розвитку).

Гідрологічна вивченість водних ресурсів України недостатня для прийняття науково обґрунтованих рішень по експлуатації та управлінню водогосподарськими системами, особливо у степовій фізико-географічній зоні. Тому перед сучасними науковцями стоїть задача розроблення методів та методик оцінювання характеристик стоку в природних та порушених антропогенною діяльністю умовах на основі математичних моделей стоку, які дозволяють імітувати стан водних ресурсів в залежності від масштабів водогосподарських перетворень та змін клімату.

**Актуальність** такого роду досліджень обумовлена необхідністю визначення вразливості водних екосистем до змін клімату та оцінки можливого стану водних ресурсів України при глобальному потеплінні.

**Метою** досліджень є установлення можливих змін водних ресурсів у різних географічних зонах України за сценаріями глобального потепління на основі математичного моделювання.

Для оцінки впливу змін клімату на річковий стік у майбутньому використовують **дві стратегії**. Згідно із **першою**, розглядаються коливання кліматичних чинників формування стоку, за якими робляться висновки про коливання водності на майбутнє, тобто можливий прогноз змін водних ресурсів за виявленою тенденцією змін кліматичних чинників. Для того, щоб реалізувати таку стратегію використовують вже розроблені методи розрахунків та прогнозів характеристик стоку, які включають до себе

метеорологічні показники. Корегуючи ці показники за виявленою тенденцією, можна отримати характеристики стоку у майбутньому. Згідно із **другою** стратегією, розробляються математичні моделі формування стоку на базі використання метеорологічних даних кліматичних сценаріїв змін клімату. У свою чергу, для отримання прогнозів змін метеорологічних характеристик у майбутньому необхідні математичні моделі змін клімату.

**Математична модель є наближеним описом будь-якого класу явищ, представленим через математичну символіку.** Математичне моделювання є методом дослідження явищ шляхом побудування їх математичних моделей.

**Кліматична модель** являє собою числовий опис кліматичної системи.

**Кліматична система** є складною системою, до якої входять такі компоненти – атмосфера, гідросфера, кріосфера, земна поверхня та біосфера.

**Клімат** є станом, включаючи його статистичний опис, кліматичної системи.

**Зміни клімату** є статистично значущими змінами у стані клімату протягом тривалого періоду часу. Зміни клімату можуть бути викликані антропогенними змінами у складі атмосфери та землекористуванні.

Підвищення глобальних середніх температур повітря викликано підвищенням концентрацій антропогенних газів в атмосфері. Зміна складу атмосфери впливає на радіаційний та енергетичний баланс Землі, що призводить до змін клімату. Числовий опис кліматичної системи (атмосфера, гідросфера, кріосфера, земна поверхня, біосфера) надається за допомогою кліматичних моделей різного рівня складності. Різнобічний опис кліматичної системи забезпечують **моделі загальної циркуляції**.

**Кліматичний сценарій** є правдоподібним описом клімату майбутнього, який розробляється для дослідження потенційних наслідків антропогенних змін клімату.

**Сценаріями викидів (емісій)** є правдоподібним описом майбутнього розвитку викидів речовин, які є потенційно радіоактивними (парникові гази, аерозолі).

Зростання концентрацій парникових газів призводить до збільшення непрозорості атмосфери для інфрачервоного випромінювання. Ця ситуація порушує радіаційний баланс. Порушення компенсується зростанням температури в системі поверхня-тропосфера, що і утворює парниковий ефект.

Сценарії викидів включають до себе опис демографії, соціально-економічного розвитку, технологічні зміни та їх взаємодію. Ці чинники мають впливати на концентрацію газів в атмосфері. На основі сценаріїв викидів розробляються сценарії змін концентрацій парникових газів у атмосфері. Отримані сценарії концентрацій використовуються як вхідні дані в кліматичну модель.

Під час розрахунків гідрометеорологічних характеристик за сценаріями використовуються **поняття проєкція**. Проєкція, на відміну від прогнозу, включає до себе припущення, наприклад, про демографічний розвиток, тому проєкції містять у собі значну невизначеність.

Для вирішення задач передбачення стану водних ресурсів в умовах змін клімату необхідно будувати такі моделі формування стоку, на вході яких використовуються метеорологічні дані: опади, температури, дефіцити вологості повітря, швидкість вітру та інше.

Саме такі моделі придатні для розрахунків і прогнозів змін водних ресурсів за даними сценаріїв глобального потепління.

Математичні моделі потребують верифікації, валідації та калібрування. *Верифікація* є доказом відповідності моделі (програми) її алгоритмам. *Валідація* є дослідженням моделі з точки зору ефективності її застосування для даного басейну відповідно до поставленого завдання. *Калібрування* є корегуванням моделі у відповідності із даними розглядуваного басейну.

Математичні моделі формування стоку класифікуються таким чином:

- **моделі області застосування;**
- **моделі опису процесів стоку;**
- **моделі просторового представлення водозбору.**

*Моделі області застосування класифікуються за метою*, для якої вони розроблені (запобігання затопленню підчас паводків та водопіль, попередження засух, оцінки впливу антропогенних чинників, комплексна оцінка впливу змін клімату на водні ресурси та інше).

*Моделі, які базуються на описі процесів стоку*, поділяються на моделі чорного ящика, стохастичні, концептуальні та фізично обґрунтовані (гідродинамічні). Моделі чорного ящика, стохастичні, концептуальні називають також боксовими.

У моделях *чорного ящика* розглядається вхід (опади) та вихід (стік) і функція впливу, яка перетворює вхід на вихід (наприклад, інтеграл Дюамеля). До цих методів відноситься метод ізохрон, розвинутий проф. Бефані А.М. та Гопченком Є.Д.

*Стохастичні моделі* містять у собі випадкову складову, вони використовують закони розподілу випадкових величин.

У *концептуальних моделях* розглядаються декілька боксів, які описують процес формування стоку (бокс формування схилового стоку, бокс формування підземного стоку, бокс руслового стоку та інше). Кожен бокс описується окремо.

*Балансові моделі* також відносяться до концептуальних, в них розглядається такі етапи процесу формування стоку як етап зволоження, інфільтрації, випаровування. Такі моделі відносять до точкових: роз'в'язок рівнянь надає відомості про стік у замикальному створі.

*Фізично обґрунтовані або гідродинамічні моделі* представляються у



вигляді диференційних рівнянь, які засновані на принципах збереження маси, імпульсу та енергії.

**За просторовим представленням водозбору** моделі поділяються на моделі із зосередженими параметрами, моделі із частковими площами розподілу, моделі із розподіленими параметрами.

*Моделі із зосередженими параметрами* оперують деякими інтегральними для всього водозбору величинами. Їх також називають точковими.

*Моделі із частковими площами розподілу* виділяють території із однорідними ландшафтними особливостями. Для кожної часткової площі визначається свій набір параметрів та застосовується концептуальний підхід до опису процесів формування стоку (модель SWAT). Тобто розрахунки виконуються не для усього водозбору у цілому, а для кожної частинної площі.

*Моделі із розподіленими параметрами* представляють водозбір у вигляді мілких масштабних сіток (растрова сітка, триангульована сітка). Диференціальні рівняння використовуються для кожної комірки.

*Напіврозподілені* моделі базуються як на фізично обґрунтованих (*на основі гідродинамічного підходу*), так і концептуальних підходах.

Серед сучасних гідрологічних моделей стоку, у яких можна використовувати метеорологічні дані сценаріїв глобального потепління, часто використовуються моделі із розподіленими параметрами. У цих моделях окрім метеорологічних даних розглядаються характеристики підстильної поверхні на водозборі. На виході таких моделей отримуються ряди поверхневого та підземного стоку, а також ряди показники якості води. Основними вхідними даними є матеріали по дощовим опадам або запасам води у сніговому покриві.

Протягом 2012-2014 рр. в Одеському державному екологічному університеті (ОДЕКУ) виконувалась науково-дослідна робота, в якій об'єктом досліджень став Тилігульський лиман: проект 7-ої Рамкової Програми ЄС «Комплексне управління водними ресурсами і прибережною зоною в Європейських лагунах в умовах змін клімату» (FP7-ENV-2011 № 283157 “Integrated water resources and coastal zone management in European lagoons in the context of climate change – Lagoons”). В цьому проекті використовувалась еко-гідрологічна модель SWIM (Soil and Water Integrated Model), яка описує взаємодію води й підстильної поверхні та була розроблена на основі двох моделей: SWAT і MATSALU. Модель SWIM була розроблена у Потсдамському інституті досліджень впливу клімату (PIK). SWIM підходить для математичного моделювання гідрологічних процесів, рослинності, ерозії і поживних речовин в мезо- та макромасштабних річкових басейнах з площею від 100 км<sup>2</sup> до 10000 км<sup>2</sup>. SWIM є напів-розподіленою еко-гідрологічною моделлю, яка включає до себе математичний опис фізичних, біохімічних і гідрохімічних процесів та

спирається на деякі концептуальні та напівемпіричні елементи. Модель має трирівневу схему поділу: басейн - суббасейн – гідротоп (гідротоп - набір одиниць в одному суббасейні, які характеризуються однаковим землекористуванням та типом ґрунту). Передбачається, що ці гідротопи характеризуються рівномірною поведінкою процесів, пов'язаних із гідрологією, агрометеорологією та гідрохімією. Перш ніж ці досліджувані процеси агрегуються на рівні суббасейна, вони розраховуються на рівні гідротопів із добовим кроком. Адекватність опису моделлю реальних гідрологічних процесів, динаміки поживних речовин, урожайності та ерозії підтверджена на даних багатьох річкових басейнів протягом останніх 15 років. Сьогодні в модель SWIM вводяться нові розрахункові модулі (наприклад, модуль “льодовик”), інші модулі посилюються з метою покращення якості моделювання (наприклад, модуль зростання сільськогосподарських культур або модуль динаміки водно-болотних угідь), також розробляються модулі управління водними ресурсами (зрошення, ставки або штучні резервуари) відповідно до конкретної мети дослідження. Модель SWIM була застосованій до водозборів різних розмірів, з початку в Німеччині, а потім і в інших європейських країнах, а також для річкових басейнів в Африці, Азії і Південній Америці.

Модель REMO (інститут метеорології імені Макса-Планка) відноситься до атмосферно-гідрологічної моделі. Вона поєднує гідрологічну модель VALTEX та кліматичну модель EU (EUROPA MODEL)

Недоліком розподілених та напів-розподілених моделей є вимога до значної щільності розташування кліматичних станцій: наприклад, для моделі SWIM є вимога, щоб була не менш, ніж одна станція на 100 км<sup>2</sup>. В країнах з малою кількістю кліматичних (метеорологічних) станцій застосування таких моделей може призвести до значних похибок у розрахунках.

В інституті проблем математичних машин і систем НАН України (м. Київ) для визначення характеристик стоку використовувались методи динамічної та статистичної деталізації (даунскейлінга) даних у моделях загальної циркуляції (МЗЦ). Завдяки статистичному даунскейлінгу полів опадів, виникає можливість використання розподілених гідрологічних моделей до прогнозування стоку за сценаріями глобального потепління. У цьому методі статистично оброблюються добові суми опадів, які спостерігались на метеорологічній станції, та за даними МЗЦ. Надалі отримується функція переходу, за якою коректуються дані, визначені за кліматичною моделлю. Саме таким шляхом були установлені опади по станціям Карпат за період 2011-2040 рр. для сценарію А2 (модель RСА3). Було показано, що частота появи 100-літніх (екстремальних) опадів в Українських Карпатах зростає у зазначений період у два рази. При застосуванні методів даунскейлінга до полів опадів при розрахунках рівнів

та витрат річки Уж останні були представлені із роздільною здатністю у 1 км.

Для оцінки впливу потенційно можливого у сучасних кліматичних умовах збільшення стоку річки Великий Куяльник на внутрішньорічну просторово-часову мінливість гідрологічних та гідрофізичних характеристик Куяльницького лиману (рівень води, солоність, температура води), які обумовлюють хімічні та біологічні процеси в ньому, і таким чином, впливають на властивості ропи та лікувальних грязей, використовувалась тривимірна гідротермодинамічна модель Delft3D FLOW.

Переваги застосування гідротермодинамічної моделі Delft3D-FLOW з пакету для 3-D моделювання Delft3D 4.01 Suite, який розроблений науково-дослідним інститутом «Делтарес» (Нідерланди), полягають в тому, що вона включає до себе блок розрахунку інтенсивності випаровування з водної поверхні, дозволяє забезпечити високу роздільну здатність у просторі та покращує точність розрахунків, дозволяє враховувати можливе осушення – затоплення окремих ділянок акваторії, широко використовується науковцями Європейського Союзу для вирішення подібних задач на різних водних об'єктах Європи.

Найчастіше при оцінці впливу змін клімату на водні ресурси територій із нещільною мережею гідрометеорологічних спостережень використовуються балансові моделі, а саме моделі водного та водно-теплового балансу. У моделях водно-теплового балансу сумісно розглядаються складові як водного балансу водозбору, так і теплового балансу підстильної поверхні. Справа у тому, що рівняння водного та теплового балансів містять у собі спільну складову – випаровування з поверхні суші. Це дозволяє застосовувати складові теплового балансу до розрахунків випаровування. Для визначення випаровування було введено поняття “максимально можливого випаровування” або “випаровуваності”, яке різними авторами визначалося як верхня межа випаровування, але інтерпретувалося по-різному: "випаровування зі зволоженої поверхні" (М.І. Будико); "випаровування з водної поверхні при тому ж комплексі метеорологічних умов, що й над сушею" (М.А. Багров); "випаровування для полів, вкритих рослинністю, коли вологість ґрунту близька до найменшої польової вологоємності" (А.Р. Константинов). У моделі “клімат-стік”, яка була розроблена в ОДЕКУ проф. Є.Д. Гопченком та проф. Н.С. Лободою використаний “теплоенергетичний еквівалент” або максимально можливе випаровування, запропонований В.С. Мезенцевим.

Зв'язки максимально можливого випаровування з температурою повітря також були запропоновані французьким вченим L. Turk(1954). Цей підхід був успішно розвинутий польським гідрологом Z. Kaszmarek (1993), та запроваджений до розрахунків змін водних ресурсів України проф. Київського Національного Університету імені Тараса Шевченка

Сніжко С.І. за сценарієм А1В (модель REMO).

У Одеському державному екологічному університеті на протязі останніх десятиріч для оцінки водних ресурсів України за метеорологічними даними використовується модель “клімат-стік”, розроблена під керівництвом проф. Є.Д. Гопченка та проф. Лободи Н.С.. Розроблення такої моделі було актуальним у другій половині ХХ сторіччя через нестачу даних спостережень за стоком як у природних, так і порушених водогосподарською діяльністю умовах. Починаючи з 80-х років минулого сторіччя актуальність, теоретична і практична значущість моделі посилилася внаслідок додавання до чинників антропогенних перетворень глобального потепління. Модель була калібрована та апробована на матеріалах про стік річок різних географічних зон України, є чутливою до сучасних змін кліматичних чинників і дозволяє із задовільною точністю оцінювати зональний стік та вплив підстильної поверхні, включаючи водогосподарські перетворення.

### **Контрольні запитання.**

1. Які математичні моделі називаються моделями з розподіленими параметрами?
2. Які моделі називають точковими або моделями з зосередженими параметрами?.
3. Які моделі називаються стохастичними?
4. Що є калібруванням математичної моделі?
5. Які моделі називають концептуальними?
6. До якого типу моделей відносяться балансові моделі?
7. Як класифікуються моделі за областю застосування?
8. Яка схема поділу водозбору використовується у моделі SWIM.
9. Особливості моделі “чорного ящика” ?
10. Які математичні моделі відносяться до фізично обґрунтованих?

## 2 СТОХАСТИЧНІ МОДЕЛІ РІЧНОГО СТОКУ У ВИДІ ПРОСТОГО ЛАНЦЮГА МАРКОВА

В основі більшості інженерно-гідрологічних методів розрахунку лежить уявлення про ймовірнісний характер коливань водності річок й інших складових водного балансу. Існуюча методологія вирішення гідрологічних задач ґрунтується на уявленні про квазістаціонарність багаторічних коливань річного стоку. Базою стохастичного моделювання є теорія стаціонарних випадкових процесів, яка використовує процеси (ланцюги) Маркова (М.В. Болгов, І.О. Сарманов, 2009; Д.Я. Раткович, 1995).

*Ланцюг Маркова є послідовністю випадкових випробувань, яка має таку властивість, що ймовірність результатів наступного випробування залежить лише від результатів попередніх випробувань.*

*Простий ланцюг Маркова розглядає послідовність річного стоку як таку, у якій розподіл ймовірностей наступної випадкової величини залежить лише від значення, яке прийняла попередня величина. Ступінь залежності (при заданому лінійному характері зв'язку) визначається величиною коефіцієнта кореляції між суміжними членами ряду, відомого під назвою “коефіцієнт автокореляції”.*

Різні модифікації опису простого ланцюга Маркова приводять до різних результатів водогосподарського розрахунку характеристик стоку, навіть при однаковому значенні коефіцієнта автокореляції. Тому для опису багаторічних коливань річного стоку обирається така модифікація, яка краще описує закономірності коливань, що спостерігаються у природі, і не призводить до істотних помилок в результатах водогосподарських розрахунків.

Сукупність умовних розподілів утворює двовимірний розподіл ймовірностей, який і є вичерпною характеристикою зв'язку між членами корельованої послідовності, яка представляє собою простий ланцюг Маркова.

Якщо розглядати ймовірність появи наступного значення  $x_{i+1}$  в залежності від попереднього  $x_i$ , то можна скористатися умовним законом розподілу системи двох випадкових нормально розподілених величин.

$$f(x_{i+1}/x_i) = \frac{1}{\sigma_{i+1} \sqrt{1-r_n^2} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma_{i+1}^2(1-r_n^2)} \left[ x_{i+1} - m_{x,i+1} - r_n \frac{\sigma_{x_{i+1}}}{\sigma_{x_i}} (x - m_{x,i}) \right]^2}. \quad (2.1)$$

Умовне математичне сподівання  $m_{x_{i+1}/x_i}$  та умовне середнє квадратичне відхилення (стандарт)  $\sigma_{x_{i+1}/x_i}$  умовного закону розподілу

будуть описані таким чином

$$m_{x_{i+1}/x_i} = \bar{x}_{(i+1)/i} = \bar{x} + r_H(x_i - \bar{x}), \quad (2.2)$$

$$\sigma_{x_{i+1}/x_i} = \sigma_{(i+1)/i} = \sigma \sqrt{1 - r_H^2}, \quad (2.3)$$

де  $m_{x_i} = \bar{x}$  - безумовне математичне сподівання розподілу випадкової величини  $X$  у перерізі  $i$  (попередній момент часу);

$m_{x_{i+1}} = \bar{x}$  - безумовне математичне сподівання розподілу випадкової величини  $X$  у перерізі  $i+1$  (наступний момент часу);

$\sigma_{x_{i+1}} = \sigma_i = \sigma$  - безумовний стандарт (середнє квадратичне відхилення) випадкової величини  $x$ ;

$r_H$  - коефіцієнт кореляції між суміжними членами ряду нормально-розподілених величин. Цей коефіцієнт також називають коефіцієнтом автокореляції та позначають як  $r(1)$ . Вирази (2.2) та (2.3) визначають лінійність кореляції і незалежність умовного стандарту від величини попереднього значення (гомоскедастичність). Однак рівняння (2.1) та (2.2) є справедливими тільки для нормально розподілених випадкових величин, а при розгляді гама - розподілу порушується як лінійність кореляції, так і гомоскедастичність умовного розподілу; ступінь нелінійності кореляції зростає зі збільшенням коефіцієнта варіації безумовного розподілу.

Для подальшого вирішення поставленої задачі моделювання річного стоку використовують наведені формули для моделювання послідовностей, які підлягають трипараметричному гама-розподілу або закону розподілу Пірсона III.

Наприклад, генерування рядів річного стоку із використанням закону розподілу Пірсона III здійснюється в такий послідовності.

1. Генерація випадкових чисел, що у подальшому розглядаються як забезпеченості, тобто  $(\delta_i = P_i)$ , де  $0 < \delta_i < 1$ .

2. Генерація значень стоку заданої забезпеченості за умови, що кореляція між стоком суміжних років відсутня ( $r_H = 0$ ). У цьому випадку кожне значення модельованого ряду позначається як  $x_i^0$ .

3. Визначення значень чисел Форстера

а) для безумовного розподілу

$$\Phi_{i+1}^0 = \frac{x_{i+1}^0 - \bar{x}}{\sigma}; \quad (2.4)$$

б) для умовного розподілу

$$\Phi_{(i+1)/i} = \frac{x_{(i+1)/i} - \bar{x}_{(i+1)/i}}{\sigma_{(i+1)/i}} . \quad (2.5)$$

Оскільки  $\delta_{i+1}$  однакове у обох випадках, можна зробити висновок, що йому відповідають однакові значення  $\Phi_{i+1}^o$  та  $\Phi_{(i+1)/i}$ , тобто

$$\frac{x_{(i+1)/i} - \bar{x}_{(i+1)/i}}{\sigma_{(i+1)/i}} = \frac{x_{i+1}^o - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (2.6)$$

З урахуванням позначень (2.2) та (2.3) одержимо

$$x_{(i+1)/i} = \bar{x} + r_n(x_i - \bar{x}) + (x_{i+1}^o - \bar{x})\sqrt{1 - r_n^2} , \quad (2.7)$$

де  $x_{(i+1)/i}$  - кожне наступне значення модельованого ряду з урахуванням його залежності від попереднього, тобто з урахуванням  $r_n$ ;

$x_{i+1}^o$  - кожне наступне значення модельованого ряду при  $r_n = 0$ .

Проблема полягає у тому, що у моделі використовуються формули (2.2) та (2.3), які справедливі для нормально розподілених величин, у той час як коливання стоку описується іншими статистичними законами.

У інституті водних проблем РАН за часів СРСР був запропонований інший принцип конструювання простого ланцюга Маркова для опису рядів річного стоку, які спираються на наявність кореляції між забезпеченостями суміжних членів ряду. Забезпеченості є рівномірно розподіленими випадковими величинами у інтервалі від нуля до одиниці.

Нехай  $x$  і  $y$  – випадкові величини, які розподілені рівномірно у проміжку  $[-1, 1]$ , і мають відповідні щільності

$$f_1(x) = \frac{1}{2}, \quad f_2(y) = \frac{1}{2}. \quad (2.8)$$

Потрібно побудувати двовимірну щільність  $f(x, y)$  у квадранті  $[-1 \leq x; y \leq 1]$  з урахуванням заданого коефіцієнта кореляції  $r_0$ . Шукана щільність представлена у вигляді розкладання по поліномах Лежандра (Д.Я. Раткович, 1976).

Якщо обмежитися в білінійному розкладанні за системою ортонормованих поліномів першими трьома членами, то двовимірна

щільність запишеться у вигляді

$$f(x, y) = \frac{1}{4} \left[ 1 + 3r_0xy + \frac{5}{4}r_0^2 (3x^2 - 1)(3y^2 - 1) \right], \quad (2.9)$$

де  $r_0$ - коефіцієнт кореляції рівномірно розподілених у  $[-1,1]$  випадкових величин.

Для побудови двовимірного закону розподілу рівномірно-розподілених випадкових величин у квадранті  $0 \leq u, v \leq 1$  (забезпеченостей) необхідно здійснити лінійну заміну змінних  $x = 2u - 1, y = 2v - 1$ . Щільність  $f(u, v)$  запишеться у вигляді

$$f(u, v) = f(P_{i+1}, P_i) = 1 + 3\lambda(2u - 1)(2v - 1) + \frac{5}{4}\lambda^2 [3(2u - 1)^2 - 1] \cdot [3(2v - 1)^2 - 1], \quad (2.10)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт кореляції між забезпеченостями.

Умовна щільність розподілу величини  $v$  буде представлена виразом

$$f(v/u) = \frac{f(u, v)}{f_1(u)}, \quad (2.11)$$

а умовна функція розподілу -

$$\begin{aligned} F(v/u) &= \int_0^v f(u, v) dv = \\ &= v + 3\lambda(2u - 1)(v^2 - v) + 5\lambda^2(6u^2 - 6u + 1)(2v^3 - 3v^2 + v) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Умовна функція розподілу для величини  $u$  записується у вигляді

$$\begin{aligned} F(u/v) &= u + 3r\lambda(2v - 1)(u^2 - u) + \\ &+ \frac{5}{2}\lambda^2 [3(2v - 1)^2 - 1] (2u^3 - 3u^2 + u) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Умовне математичне сподівання дорівнює

$$m(u/v) = \bar{P}_{(i+1)/i} = \frac{1}{2} + \frac{r_0}{2}(2P_i + 1), \quad (2.14)$$



а умовна дисперсія

$$\sigma_{u/v}^2 = \sigma_{(i+1)/i}^2 = \frac{1-\lambda^2}{12}. \quad (2.15)$$

Умовна дисперсія не залежить від попереднього значення забезпеченості  $P_i$  і, отже, кореляція гомоскедастична.

Рівняння (2.10) є лінійним спільним законом розподілу рівномірно розподілених величин (забезпеченостей). Цього досить для того, щоб моделювати ряд забезпеченостей необхідної довжини із заданим значенням коефіцієнта кореляції між ними  $|\lambda| \leq 0,55$ . Для моделювання випадкових значень використовується такий спосіб: задається значення  $u = u_1$  і підставляється воно в (1.13). Далі з таблиці випадкових чисел  $[0, 1]$  беруться значення функції розподілу  $F(v/u)$  і для знаходження випадкового значення  $v_1$  вирішується кубічне рівняння (2.13). Для генерування випадкового часового ряду із заданими властивостями отримане значення  $v_1$  ставиться на місце  $u_1$  й описана процедура генерації повторюється. Незважаючи на простоту й універсальність методу, мають місце дві обставини, які необхідно взяти до уваги. Лінійна кореляція між забезпеченостями приводить (у даній теоретичній схемі) до нелінійної кореляції між самими випадковими величинами. Якщо ж спочатку будувати лінійну кореляцію між вихідними випадковими величинами, то кореляція між їхніми забезпеченостями буде нелінійною. У цьому випадку необхідно використовувати відповідну умовну функцію розподілу і, вирішуючи зворотну задачу, знаходити відповідне умовне значення по заданих  $F(x/y)$  і коефіцієнті кореляції.

Для моделювання випадкового процесу із заданим законом розподілу необхідно вказати співвідношення між коефіцієнтом кореляції для забезпеченостей  $\lambda$  і коефіцієнтом кореляції для вихідних випадкових величин  $r_r$ . Зокрема, для двовимірного закону, одержаного шляхом обмеження в розкладанні першими трьома членами і з нормальними апріорними щільностями, справедлива формула

$$r_r = \frac{3}{\pi} \lambda \quad (2.16)$$

При груповому аналізі матеріалів спостережень за стоком, коли точні числові параметри розподілу ймовірностей для кожного окремого пункту невідомі, а іноді й сам тип розподілу недостатньо достовірний, зручніше розглядати ряди забезпеченостей.

При стохастичному моделюванні рядів річного стоку (ОДЕКУ,

модель “клімат-стік”) спочатку генерувалися ряди забезпеченостей з подальшим переходом до відповідних значень стоку, які являють собою послідовність випадкових величин, зв'язаних кореляцією Марківського нелінійного типу з маргінальним трипараметричним гама-розподілом С.М.Крицького і М.Ф.Менкеля. При цьому попередньо була задана послідовність з 4000 випадкових рівномірно розподілених чисел в інтервалі  $(0,1)$ , зв'язаних лінійною лежандрівською кореляцією. Особливістю такого роду кореляції є те, що структура послідовності забезпеченостей випадкових величин не залежить ні від типу розподілу величин стоку, ні від числових значень параметрів цього розподілу. Таким чином, запропонована модель застосовує кореляцію між забезпеченостями (рівномірно розподіленими випадковими величинами).

### **Контрольні запитання.**

1. Дати визначення простого ланцюга Маркова.
2. Що означає властивість “гомоскедастичності” умовної дисперсії або умовного середнього квадратичного відхилення?
3. Чому умовний закон розподілу системи двох нормально розподілених випадкових величин не може бути застосованим для стохастичного моделювання річного стоку?
4. Чому генерування рядів забезпеченостей, зв'язаних лінійною лежандрівською кореляцією, є більш ефективним ніж генерування значень стоку з нелінійною кореляцією між попередніми і наступними значеннями?

### 3 АТМОСФЕРНА ЦИРКУЛЯЦІЯ НАД УКРАЇНОЮ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ГІДРОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

**Кліматичну систему утворюють** – атмосфера, океан та суходіл (АОС).

Ланками кліматичної системи також можуть бути кріосфера (морський лід, льодовики, сніговий покрив), біосфера (визначається рослинністю), літосфера (верхня тверда оболонка земної кулі).

**Погода** є характеристикою стану нижнього шару атмосфери у певній місцевості в конкретний час або протягом тривалого часу, характеризується метеорологічними елементами.

**КЛІМАТ** – багаторічний режим погоди, зумовлений сонячною радіацією, її перетворенням у діяльному шарі земної поверхні та пов'язаною з нею циркуляцією атмосфери й океанів і характерний для певної місцевості.

**Глобальний клімат** – статичний режим системи “атмосфера-океан-суходіл” (АОС), який встановлюють за даними спостережень за тривалий інтервал часу, включає до себе характеристики стану режимів температури і вологості, руху, циркуляції потоків в атмосфері та океані.

**Регіональний клімат** є характеристикою заданого регіону і являє собою сукупність і повторюваність умов формування погоди з їх сезонними змінами.

**Кліматоутворювальні чинники** діляться зовнішні і внутрішні. Зовнішніми є астрономічні (світність Сонця, положення орбіти, нахил осі до площини орбіти, швидкість обертання навколо осі та інше) і геофізичні (розмір та маса Землі, магнітні та гравітаційні поля, внутрішнє тепло від геотермічних джерел та вулканів) чинники. Внутрішні кліматоутворювальними чинниками є фізико-хімічна структура атмосфери, маса атмосфери, маса і склад океану, розподіл суходолу і океану, структура їх діяльного шару, рельєф поверхні суходолу.

**Зміною клімату** є суттєва та тривала зміна у статистичному розподілі погодних умов протягом тривалих проміжків часу: від десятиліть до мільйонів років. Це може бути зміна в середніх погодних умовах, або у розподілі погоди навколо середніх умов (наприклад, часті або рідкі екстремальні погодні явища).

Зміна клімату означає зміну стану клімату, яку можна ідентифікувати (наприклад, за допомогою статистичних тестів) шляхом зміни середнього значення та / або мінливості його властивостей, що зберігається протягом тривалого періоду, як правило, десятиліття або довше.

**Адаптація** до змін клімату є процесом пристосування до фактичного або очікуваного клімату та наслідків його змін.

**Пом'якшення** наслідків зміни клімату є втручання людини з метою

зменшення викидів або посилення поглинання парникових газів;

Стан регіонального клімату характеризується особливостями атмосферних процесів. У цих процесах відбувається обмін кількістю руху, теплом та вологою.

**Загальною циркуляцією атмосфери називають сукупність основних повітряних течій (великомасштабних рухів), які здійснюють горизонтальний та вертикальний обмін мас повітря.**

Загальна циркуляція атмосфери зумовлена

- розподілом сонячної радіації навколо земної кулі
- обертанням Землі
- змінами сонячної активності.

Загальна циркуляція атмосфери характеризується термобаричними схемами, до складу яких входять центри дії атмосфери. **Центри дії атмосфери – це області постійного існування підвищеного та пониженого тиску.** Для Західної Європи такими центрами дії атмосфери є Азорський максимум (Понта-Дельгада) та Ісландський мінімум (Рейк'явік). Для характеристики дії таких баричних утворень використовуються індекси атмосферної циркуляції, які базуються на різниці баричних характеристик між центрами дії атмосфери.

Загальну циркуляцію атмосфери можна віднести до внутрішніх чинників, які утворюють клімат. Головним чинником формування клімату є радіаційний баланс у системі «земля – атмосфера». Порушення рівноваги цієї системи викликані, перш за все, антропогенним навантаженням на оточуюче середовище (наприклад, «парниковий ефект»). Зміна в сумарній радіаційній енергії, яка існує в глобальній системі «земля – атмосфера», називається радіаційним впливом. Підвищення концентрації парникових газів викликає перерозподіл енергії усередині системи «атмосфера-океан - суходіл». Коли радіаційний вплив змінюється, кліматична система дає відгук у різних часових масштабах. Цей відгук проявляється у змінах глобального гідрологічного циклу, атмосферній і океанічній циркуляції, у характеристиках полів метеорологічних величин. Регіональні зміни метеорологічних характеристик, насамперед, температури повітря співвідносяться із різними фазами атмосферно-океанічних коливань. Останні характеризують термобаричні взаємодії у системі «океан-атмосфера».

На гідрометеорологічні характеристики Північної півкулі суттєво впливають такі великомасштабні термобаричні схеми: Північно-Атлантичне коливання (ПАК), Ель-Ніньо-Північне коливання (ЕНПК), Тихоокеансько-Північно-Американська схема (ТПА), Східно-Атлантичне коливання (САК), Скандинавське коливання (СКАНД), Індокоеанський диполь (ІОД).

Встановлено, що найбільший вплив на клімат Європи має ПАК. Ця термобарична схема відображає наявність коливань аномалій тиску в

атмосфері Північної Атлантики. Дію атмосферних процесів можна оцінити за допомогою індексів атмосферних процесів, які зазвичай розраховуються як різниця між характеристиками тиску у певних точках. Наприклад, індекс ПАК можна оцінити як різницю між зниженим тиском Ісландії (Ісландський мінімум) і підвищеним тиском Азорських островів (Азорський максимум). Коливання аномалій тиску викликають зміни у коливаннях клімату на Європейському континенті. Позитивні значення індексів Північно-Атлантичного коливання зв'язують із підвищенням температур повітря та опадів в Північній Європі та зменшенням температури та кількості опадів у Південній Європі. Та навпаки, негативні індекси ПАК супроводжуються більш сухим кліматом в Північній Європі, та більш теплим й вологим кліматом у Південній Європі.

Ще одним впливовим типом атмосферної циркуляції є СКАНД (Скандинавське коливання), яке характеризує баричний градієнт між Скандинавським півостровом і півднем Європи.

Для пошуку зв'язків між гідрометеорологічними характеристиками та індексами атмосферних коливань нами були використані матеріали спостережень за середньомісячними та річними значеннями опадів, температурою повітря та стоку річок для метеостанцій і гідрологічних постів з періодом спостережень, який перевищує або є близьким до 100 років. До числа розглянутих метеорологічних станцій відносяться метеостанції Західної (Правобережної) України: Житомир, Кам'янець-Подільський, Тернопіль; до метеостанцій Східної (Лівобережної) України: Умань, Луганськ та Харків. Інформація по річному стоку Західної України включає до себе: р. Дністер – м. Бендери, р. Прут – м. Чернівці, р. Західний Буг – м. Вишків, р. Дністер – с. Заліщики, р. Південний Буг – с. Олександрівка, р. Прип'ять – м. Мозир. Нами також були досліджені прилеглі до території Західної України водозбори: р. Дунай – м. Братислава, р. Мюреш – м. Арад. До водозборів Східної України відносяться: р. Десна – м. Чернігів, р. Сіверський Донець – м. Зміїв.

Для оцінки відгуку клімату та водних ресурсів України на зміни, що відбуваються в атмосферних процесах, були визначені коефіцієнти кореляції між індексами атмосферних процесів та гідрометеорологічними характеристиками.

Як основний метод досліджень був застосований метод лінійної парної регресії, на основі якого установлювалися зв'язки між гідрометеорологічними характеристиками та індексами атмосферної циркуляції. Установлено, що найтісніші зв'язки з метеорологічними характеристиками має індекс Північно-Атлантичного коливання. Коефіцієнт кореляції річних значень цього індексу із річними сумами опадів змінюється від 0,17 (м. Тернопіль) до 0,30 (м. Харків)(табл. 3.1), а із середньомісячними температурами повітря – від 0,09 (м. Луганськ) до 0,39 (м. Житомир та м. Тернопіль).

Вплив Північно-Атлантичного колювання на формування кліматичного режиму України зменшується при переході від заходу до північного сходу та сходу. Слід зазначити, що після переходу річного індексу ПАК на початку 80-х років до позитивної фази колювань, внесок Північно-Атлантичного колювання у формування температурного режиму та режиму зволоження посилюється (табл. 3.1).

Максимальне значення коефіцієнту кореляції між індексами ПАК та річними сумами опадів після 80-го року минулого сторіччя змінюється від 0,26 (м. Умань) до 0,75 (м. Тернопіль). Тіснота кореляційних зв'язків між індексами ПАК та середньорічними температурами повітря значно вища: коефіцієнт кореляції на території України змінюється від 0,40 (м. Луганськ) до 0,80 (м. Кам'янець-Подільський). На сезонний розподіл температур повітря Північно-Атлантичне колювання найбільше впливає навесні (табл.1), а на сезонний розподіл опадів - в зимовий сезон.

Безпосередній вплив індексів ПАК на колювання річного стоку є більш значущим для річок Західної України (табл. 3.2). Коефіцієнт кореляції між річними індексами ПАК та річним стоком змінюється від 0,00 (р. Прип'ять – м. Мозир) до 0,39 (р. Південний Буг – с. Олександрівка), та досягає найменшого значення на півночі України (р. Дніпро – м. Київ, р. Прип'ять – м. Мозир, р. Десна – м. Чернігів). Установлено, що після переходу річних індексів ПАК до позитивної фази колювань (після 1980 року) відбулось зростання тісноти зв'язків між ними та величинами річного стоку.

Пошук впливу Скандинавського колювання на формування температурного режиму та режиму зволоження дозволив установити, що вплив Скандинавського колювання в найбільшій мірі проявляється на північному сході та півночі розглянутої території: метеостанції Київ, Харків, Умань, Луганськ (табл.3). Після 1980 р. вплив Скандинавського колювання посилюється, що знайшло своє відображення у зростанні коефіцієнтів кореляції. Наприклад,  $r_{X,СК} = 0,16$  при розгляді всього періоду спостережень та  $r_{X,СК} = 0,33$  для періоду з 1981 по 2002 рр (м. Київ). Індеси Скандинавського колювання найбільш тісно зв'язані із температурами зимового сезону.

Коефіцієнт кореляції між річним стоком та індексом Скандинавського колювання перевищує кореляцію із індексами ПАК у межах північної та північно-східної території України. Наприклад, для р. Прип'ять – м. Мозир коефіцієнт кореляції з індексом ПАК складає 0,00, а із Скандинавським індексом – 0,20 при розгляді всього періоду спостережень, а для періоду 1981-2002 рр. коефіцієнти кореляції змінюються на 0,22 та 0,35 відповідно. Для р. Сіверський Донець та р. Десна – м. Чернігів коефіцієнт кореляції річного стоку із індексами СК перевищує 0,45 (табл. 3.3).

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти кореляції між індексами Північно-Атлантичного коливання та кліматичними характеристиками

Метеостанції (роки спостережень)	Параметр	За весь період спостережень					За період спостережень до 1980 року					За період спостережень після 1980 року				
		Рік	Зима (XII- II)	Весна (III- V)	Літо (VI- VIII)	Осінь (IX- XI)	Рік	Зима (XII- II)	Весна (III- V)	Літо (VI- VIII)	Осінь (IX- XI)	Рік	Зима (XII- II)	Весна (III- V)	Літо (VI- VIII)	Осінь (IX- XI)
<i>Житомир</i> (1936-1990)	X	<b>0,19</b>	0,22	0,19	0,19	0,11	<b>0,18</b>	0,34	0,22	0,02	0,16	<b>0,19</b>	0,03	0,18	0,21	0,22
	T	<b>0,39</b>	0,17	0,42	0,39	0,07	<b>0,24</b>	0,03	0,38	0,10	0,07	<b>0,64</b>	0,75	0,67	0,00	0,50
<i>Умань</i> (1886-2001)	X	<b>0,24</b>	0,33	0,09	0,24	0,12	<b>0,30</b>	0,40	0,12	0,16	0,07	<b>0,26</b>	0,06	0,12	0,10	0,18
	T	<b>0,27</b>	0,10	0,37	0,27	0,12	<b>0,12</b>	0,10	0,30	0,16	0,07	<b>0,59</b>	0,59	0,54	0,00	0,27
<i>Київ</i> (1881-2001)	X	<b>0,24</b>	0,28	0,11	0,24	0,00	<b>0,23</b>	0,30	0,08	0,03	0,12	<b>0,47</b>	0,14	0,29	0,18	0,43
	T	<b>0,31</b>	0,14	0,35	0,31	0,10	<b>0,20</b>	0,02	0,30	0,11	0,06	<b>0,59</b>	0,60	0,52	0,00	0,16
<i>Кам'янець-Подільський</i> (1936-1990)	X	<b>0,28</b>	0,37	0,06	0,28	0,10	<b>0,26</b>	0,43	0,04	0,15	0,03	<b>0,54</b>	0,21	0,36	0,23	0,60
	T	<b>0,30</b>	0,25	0,32	0,30	0,07	<b>0,05</b>	0,01	0,23	0,18	0,26	<b>0,80</b>	0,53	0,56	0,04	0,49
<i>Тернопіль</i> (1881-1990)	X	<b>0,17</b>	0,26	0,06	0,04	0,06	<b>0,09</b>	0,26	0,03	0,11	0,00	<b>0,75</b>	0,43	0,36	0,57	0,61
	T	<b>0,39</b>	0,19	0,38	0,39	0,11	<b>0,30</b>	0,06	0,34	0,16	0,02	<b>0,79</b>	0,70	0,61	0,10	0,58
<i>Луганськ</i> (1881-2002)	X	<b>0,26</b>	0,18	0,26	0,13	0,11	<b>0,27</b>	0,25	0,13	0,22	0,06	<b>0,34</b>	0,15	0,19	0,23	0,39
	T	<b>0,09</b>	0,06	0,20	0,15	0,05	<b>0,04</b>	0,24	0,30	0,22	0,08	<b>0,40</b>	0,47	0,48	0,11	0,01
<i>Харків</i> (1881-2002)	X	<b>0,30</b>	0,36	0,22	0,06	0,12	<b>0,32</b>	0,40	0,27	0,02	0,11	<b>0,41</b>	0,20	0,00	0,21	0,28
	T	<b>0,17</b>	0,04	0,27	0,05	0,03	<b>0,04</b>	0,13	0,19	0,08	0,08	<b>0,47</b>	0,51	0,51	0,08	0,19

Таблиця 3.2 – Кореляція річного стоку (кореляція) із індексами Північно-Атлантичного ( $I_{ПАК}$ ) та Скандинавського ( $I_{СК}$ ) коливань

<i>Пост</i>	<i>Кореляція з <math>I_{ПАК}</math></i>			<i>Кореляція з <math>I_{СК}</math></i>		
	За весь період спостережень	До 1980 року	Після 1980 року	За весь період спостережень	До 1980 року	Після 1980 року
р.Дніпро – м.Київ	<b>0,13</b>	0,14	0,15	<b>0,25</b>	0,33	<b>0,51</b>
р.Прип'ять – м.Мозир	<b>0,00</b>	0,10	0,22	<b>0,20</b>	0,06	<b>0,35</b>
р.Південний Буг – с.Олександрівка	<b>0,39</b>	0,39	<b>0,47</b>	<b>0,08</b>	0,03	0,19
р.Десна – м.Чернігів	<b>0,13</b>	0,22	0,19	<b>0,46</b>	0,29	<b>0,57</b>
р.Дністер – с.Заліщики	<b>0,20</b>	0,19	<b>0,31</b>	<b>0,10</b>	0,07	0,07
р.Західний Буг – м.Вишків	<b>0,11</b>	0,04	0,24	<b>0,10</b>	0,07	0,24
р.Сів.Донець – м.Зміїв	<b>0,37</b>	0,47	0,27	<b>0,48</b>	0,20	0,14
р.Прут – м.Чернівці	<b>0,28</b>	0,32	<b>0,31</b>	<b>0,07</b>	0,12	0,06
р.Тиса – м.Жегед	<b>0,43</b>	0,42	<b>0,65</b>	<b>0,08</b>	0,02	0,39
р.Мюреш – м.Арад	<b>0,24</b>	0,23	<b>0,43</b>	<b>0,07</b>	0,08	0,02
р.Дністер – м.Бендери	<b>0,25</b>	0,21	<b>0,35</b>	<b>0,12</b>	0,02	0,01
р.Дунай – м.Братислава	<b>0,21</b>	0,17	<b>0,63</b>	<b>0,14</b>	0,08	0,35



Таблиця 3.3 – Коефіцієнти кореляції між індексами Скандинавського коливання ( $I_{СК}$ ), річними опадами (X) і середньорічними температурами повітря (T)

Метеостанції (роки спостережень)	Параметр	За весь період спостережень					За період спостережень до 1980 року					За період спостережень після 1980 року				
		Рік	Зима (XII- II)	Весна (III- V)	Літо (VI- VIII)	Осінь (IX- XI)	Рік	Зима (XII- II)	Весна (III- V)	Літо (VI- VIII)	Осінь (IX- XI)	Рік	Зима (XII- II)	Весна (III- V)	Літо (VI- VIII)	Осінь (IX- XI)
<i>Житомир</i> (1936-1990)	X	<b>0,19</b>	0,13	0,35	0,01	0,32	<b>0,19</b>	0,37	0,39	0,22	0,26	<b>0,19</b>	0,24	0,39	0,15	0,21
	T	<b>0,21</b>	0,20	0,00	0,00	0,00	<b>0,04</b>	0,12	0,16	0,04	0,03	<b>0,23</b>	0,24	0,14	0,63	0,09
<i>Умань</i> (1886-2001)	X	<b>0,05</b>	0,18	0,22	0,01	0,10	<b>0,09</b>	0,09	0,40	0,19	0,30	<b>0,13</b>	0,03	0,04	0,02	0,02
	T	<b>0,17</b>	0,31	0,05	0,10	0,07	<b>0,03</b>	0,15	0,13	0,02	0,04	<b>0,20</b>	0,37	0,01	0,19	0,05
<i>Київ</i> (1881-2001)	X	<b>0,16</b>	0,21	0,24	0,04	0,29	<b>0,13</b>	0,19	0,17	0,02	0,37	<b>0,33</b>	0,12	0,26	0,18	0,28
	T	<b>0,21</b>	0,30	0,07	0,07	0,00	<b>0,03</b>	0,10	0,07	0,08	0,02	<b>0,23</b>	0,38	0,04	0,20	0,00
<i>Кам'янець-Подільський</i> (1936-1990)	X	<b>0,26</b>	0,16	0,02	0,00	0,45	<b>0,33</b>	0,05	0,19	0,19	0,51	<b>0,21</b>	0,53	0,58	0,22	0,05
	T	<b>0,13</b>	0,13	0,04	0,09	0,01	<b>0,05</b>	0,12	0,16	0,10	0,03	<b>0,32</b>	0,03	0,17	0,59	0,07
<i>Тернопіль</i> (1881-1990)	X	<b>0,27</b>	0,02	0,07	0,10	0,66	<b>0,32</b>	0,05	0,17	0,18	0,56	<b>0,00</b>	0,10	0,15	0,07	0,14
	T	<b>0,10</b>	0,17	0,03	0,03	0,03	<b>0,04</b>	0,09	0,20	0,04	0,06	<b>0,32</b>	0,20	0,27	0,64	0,09
<i>Луганськ</i> (1881-2002)	X	<b>0,07</b>	0,12	0,09	0,00	0,23	<b>0,30</b>	0,04	0,18	0,08	0,56	<b>0,08</b>	0,09	0,03	0,15	0,17
	T	<b>0,25</b>	0,29	0,12	0,04	0,07	<b>0,12</b>	0,15	0,14	0,13	0,01	<b>0,22</b>	0,23	0,03	0,09	0,16
<i>Харків</i> (1881-2002)	X	<b>0,19</b>	0,36	0,09	0,03	0,01	<b>0,20</b>	0,03	0,03	0,22	0,18	<b>0,20</b>	0,27	0,44	0,01	0,03
	T	<b>0,04</b>	0,00	0,25	0,15	0,06	<b>0,01</b>	0,11	0,08	0,17	0,02	<b>0,26</b>	0,42	0,04	0,16	0,11

**Висновки.** Північно-Атлантичне коливання значною мірою впливає на формування температурного режиму (весна, III-V), режиму зволоження (зима, XII-II). Коефіцієнти кореляції між гідрометеорологічними характеристиками та індексами Північно-Атлантичного коливання зменшуються у напрямі із заходу на схід. Після 1981 року вплив Північно-Атлантичного коливання посилюється. Значущий лінійний зв'язок між індексами ПАК та сезонними гідрометеорологічними характеристиками температур повітря став спостерігатися як у весняний, так і зимовий сезон. А між індексами ПАК та характеристиками опадів як у зимовий, так і осінній (IX-XI) сезони.

Вплив Скандинавського коливання є суттєвим для півночі та північного сходу (метеостанції Київ, Харків, Луганськ, Умань, гідрологічні пости р. Дніпро - м. Київ, р. Десна – м. Чернігів, р. Прип'ять – м. Мозир).

### **Контрольні запитання**

1. Дати визначення Північно-Атлантичного коливання (ПАК)
2. Дати визначення Скандинавського коливання (СКАНД)
3. Територіальний вплив Скандинавського коливання на стік річок України
3. Територіальний вплив Північно-Атлантичного коливання на стік річок України.

#### 4 ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА ЛЬОДОВИЙ РЕЖИМ РІЧОК

Термічний режим річок України характеризується датою стійкого переходу температур води через  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  восени, що спостерігається в середньому у першій декаді грудня, найраніше – у середині листопада, найпізніше – у третій декаді січня. У межах України відзначається велика амплітуда дат настання перших льодових явищ на різних водозборах. Льодоутворення формується під впливом вторгнення холодного повітря, яке зумовлює у жовтні зменшення середньої місячної температури до  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а у грудні відбувається перехід до від’ємних значень.

У минулому сторіччі льодові явища спостерігалися майже на всіх річках. Основним чинником їх утворення є кліматичні умови, а саме тривалість та абсолютні значення температури повітря нижче  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Формування льоду та його товщина залежать також від швидкості течії. Загальновідомо, що в умовах швидкої течії товщина криги менша, ніж коли швидкість мала. На льодовий режим істотно впливає й антропогенна діяльність, насамперед скиди стічних вод комунальних і промислових підприємств, а також зарегулювання річок шляхом будівництва водосховищ. Спостереження за льодовими явищами на гідрологічних постах полягають у встановленні дат їх настання та закінчення — як осінніх, так і весняних. Зокрема, восени встановлюють дату початку льодових явищ, льодоходу та шугоходу, а також льодоставу. Навесні спостерігають за початком льодоходу та закінченням льодових явищ. За цими даними можна встановити тривалість льодових явищ.

Особливістю льодового режиму річок України є те, що в умовах змін глобального клімату спостерігається нестійкість температурного режиму, і пов’язане з цим неодноразове льодоутворення. На початку ХХІ сторіччя відмічається зростання різниці між датами появи перших льодових явищ і датами встановленням льодоставу.

Для вивчення льодового режиму були обрані річки західної (Дністер), східної (Десна) та південної України (Тилігул). Були визначені характерні строки льодових явищ на досліджуваних річках за багаторічний період (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Дати появи льодових явищ (1960 – 2008 рр.)

Річка – пост	Дата появи льоду		
	рання	середня	пізня
Дністер – м. Могильов - Подільський	04.11.1979	01.12	18.02.1983
Десна – м. Чернігів	01.11.1979	28.11	29.01.2007
Тилігул – смт Березівка	16.10.1976	02.11	21.12.1996

У зв'язку із кліматичними змінами у останні десятиріччя строки настання льодових явищ на річках України суттєво змістились на більш пізні. Наприклад, на р. Дністер перші льодові явища стали спостерігатися у січні-березні, а раніше проходили у листопаді-грудні (рис. 4.1). Аналогічні зміни встановлені на річках Десна і Тилігул.

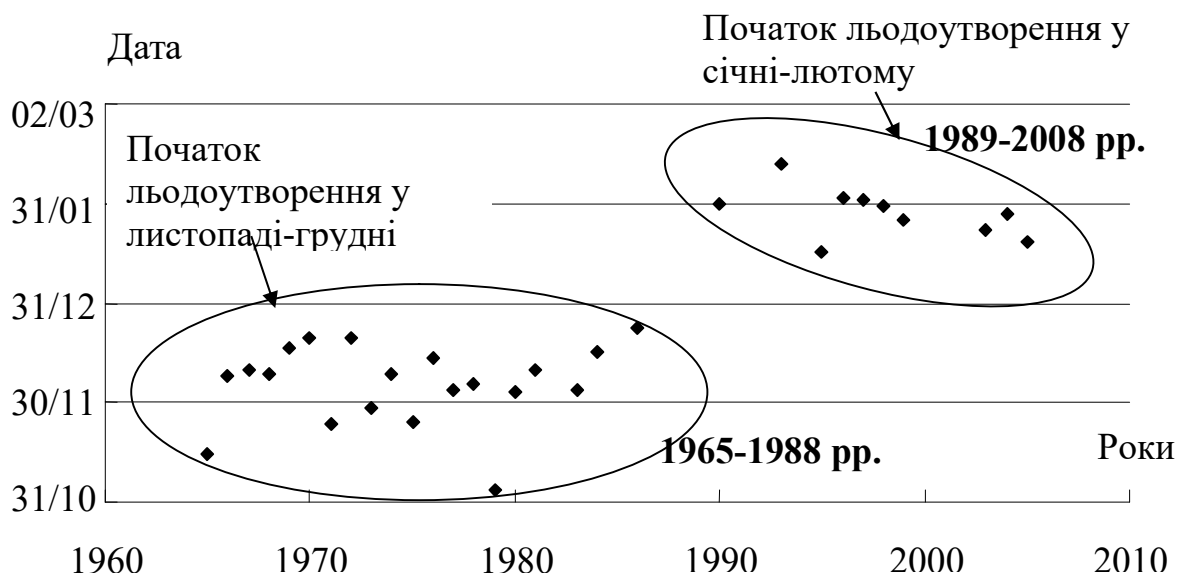


Рисунок 4.1 – Дати утворення льодових явищ на річці Дністер – м.Могильов–Подільський (1965 – 2008 pp.)

Головним чинником формування клімату є радіаційний баланс у системі «земля – атмосфера». Порушення рівноваги цієї системи викликані перш за все антропогенним навантаженням на оточуюче середовище. На гідрометеорологічні характеристики Північної півкулі суттєво впливають такі великомасштабні термобаричні схеми: Північно-Атлантичне колювання (ПАК), Ель-Ніньо-Північне колювання (ЕНПК), Тихоокеансько-Північно-Американська схема (ТПА), Східно-Атлантичне колювання (САК), Скандинавське колювання (СКАНД), Індокоеанський диполь (ІОД).

Встановлено, що найбільший вплив на клімат Європи має ПАК. На практиці характер дії атмосферних процесів можна оцінити за допомогою індексів атмосферних процесів, які зазвичай розраховуються як різниця між тиском у певних точках. Установлено (Лобода Н.С., 2011), що басейн р. Дністер знаходиться в області дії ПАК, басейн р. Десна – в області дії СКАНД.

Індекс ПАК оцінюється через різницю між зниженим тиском Ісландії (Ісландський мінімум) і підвищеним тиском Азорських островів (Азорський максимум). Динаміка атмосфери активніша протягом арктичної зими, тому найбільш уживаним є значення зимового індексу ПАК (грудень-березень). Від'ємна фаза зимових індексів ПАК тривала до 1980-х років (рис. 4.2). За останні 25 років відбулося різке збільшення

ПАК, з 80-х років минулого сторіччя він залишився в додатній фазі та продемонстрував тенденцію до збільшення таким чином, що в кінці ХХ сторіччя спостерігалися найбільші індекси за весь період спостережень. Активність ПАК сприяла сильному прогріванню поверхні Північної півкулі за останні десятиріччя.

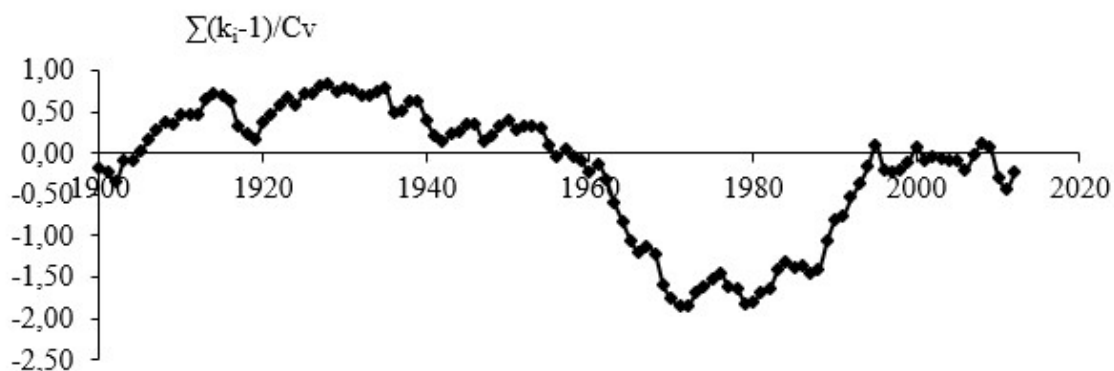


Рисунок 4.2 – Різницева інтегральна крива багаторічних значень зимових індексів ПАК

Ще одним впливовим типом атмосферної циркуляції є СКАНД, яке характеризує баричний градієнт між Скандинавським півостровом і півднем Європи. Починаючи з 1979 року, індекси СКАНД знаходяться у від'ємній фазі коливаль (рис. 4.3), яка на території Європи обумовлює стійкі температури повітря, без різких знижень, і сприяє формуванню більш м'яких зим. За дослідженнями Лободи Н.С. (2012) встановлено, що СКАНД впливає на формування характеристик річного та максимального стоку р. Дніпро, включаючи Українське Полісся.

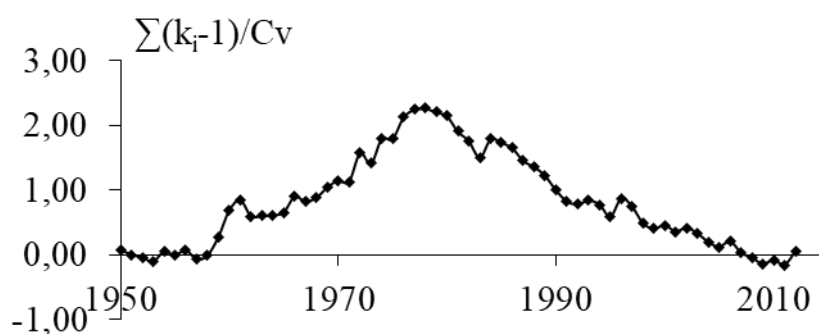


Рисунок 4.3 – Різницева інтегральна крива багаторічних значень середнього річного індексу СКАНД

За даними В.В. Гребіня 1989 рік розглядається як єдина у межах країни розрахункова дата початку суттєвих змін водного режиму річок України у результаті змін глобального клімату. Нами були встановлені зміни термічного та льодового режимів річок Дністер, Десна і Тилігул за

допомогою порівняльного аналізу даних спостережень 1960-1988 років із даними за період з 1989 по 2008 роки.

В басейні р. Дністер в останні десятиріччя відбулося підвищення температури повітря в осінньо-зимовий період (рис. 4.4 а): на 2,3 °С (січень-березень) і на 0,2 °С (жовтень-грудень), що викликало збільшення температури води у р. Дністер в осінньо-зимовий період в середньому на 2,5 °С порівняно з попередніми роками (рис. 4.4 б).

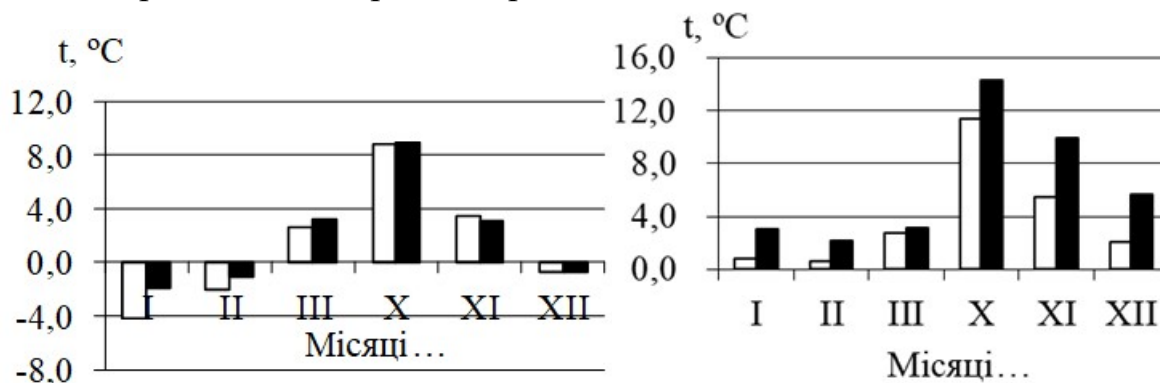


Рисунок 4.4 – Зміна температур повітря (а) по метеостанції м. Могильов-Подільський і температура води (б) у р. Дністер білі стовпчики – у 1960-1988 роки, чорні – у 1989-2008 роки

Суттєво змістилися строки встановлення льодових явищ (табл. 4.2), значно скоротилась їх тривалість (рис. 4.5). Найпомітніші зміни стосуються тривалості льодоставу, яка зменшилась на 1-2 декади. За даними Центральної геофізичної обсерваторії після 1986 року льодостав на р. Дністер взагалі відсутній.

Встановлено, що кількість днів від переходу температури повітря через 0 °С до появи льодових явищ в останні роки збільшилась: від 2-5 днів (1960-1988 рр.) до 25-35 днів (1989-2008 рр.). Це викликано, в першу чергу, зміною кліматичних умов в Україні, і відповідним підвищенням температури води у р. Дністер.

Таблиця 4.2 – Середні строки початку та закінчення льодових явищ на р. Дністер (м. Могильов-Подільський) за періоди 1960–1988 та 1989–2008 рр.

Початок осінніх льодових явищ		Закінчення льодових явищ		Середня кількість днів з льодовими явищами	
1960-1988рр.	1989-2008 рр.	1960-1988рр.	1989-2008 рр.	1960-1988рр.	1989-2008 рр.
12 грудня	24 січня	14 березня	12 лютого	74	12

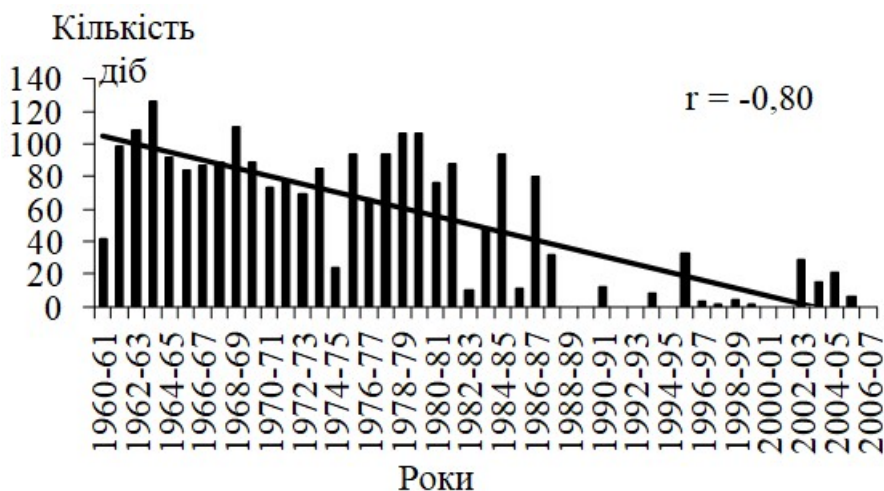


Рисунок 4.5 – Динаміка зміна тривалості льодових явищ на р. Дністер – м. Могильов-Подільський за період 1960–2008 роки

Виявлено тісний зв'язок між річними індексами ПАК та середньою річною температурою повітря (м. Могильов – Подільський): коефіцієнт кореляції становить 0,71. Для зимового індексу ПАК коефіцієнт кореляції із середніми річними температурами повітря становить 0,66. Лінійний зв'язок між середніми температурами холодного сезону (листопад – березень) та зимовими індексами ПАК характеризується  $r = 0,69$ . Вплив річних та зимових значень індексів ПАК на температурний режим теплого (квітень – жовтень) сезону року значно менший: коефіцієнти кореляції між індексами ПАК за рік та зиму й середніми температурами за період квітень – жовтень дорівнюють 0,46 та 0,42 відповідно. Слід зазначити, що зв'язок між зимовим значенням індексу ПАК та середніми температурами за зимовий сезон має зворотний характер: коефіцієнт кореляції дорівнює -0,46. Зростання величин зимового індексу ПАК обумовлює тенденцію до зниження температур повітря у зимовий сезон.

Найбільший вплив зимовий індекс ПАК має на середню місячну температуру березня (рис. 4.6). Тіснота кореляційного зв'язку досить висока й дорівнює 0,70. У квітні цей вплив дещо зменшується ( $r = 0,41$ ). Таким чином, Північно – Атлантичне коливання значною мірою обумовлює формування температурного режиму у зимовий та весняний сезони. Аналогічні зміни були встановлені у характеристиках термічного та льодового режимів річок Десна і Тилігул. Визначені загальні тенденції останніх десятиріч (1989–2008 рр.):

- зростання температур повітря на початку року;
- підвищення температури води у річках на протязі осінньо-зимового періоду;
- більш пізній початок льодоутворення, і ранне очищення річок від льоду;
- скорочення тривалості льодового режиму.

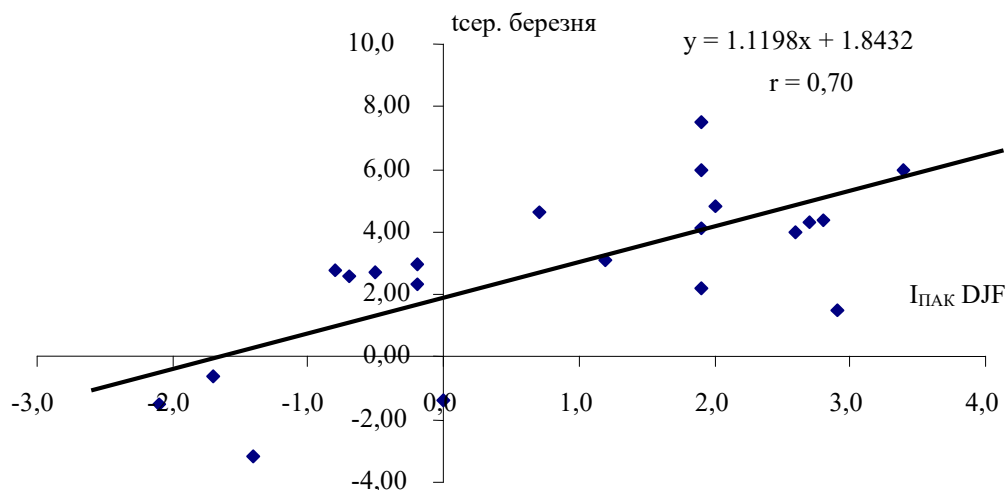


Рисунок 4.6 – Залежність середньомісячної температури повітря березня від зимових (грудень – лютий) індексів ПАК.

Зазначені зміни обумовлюють складність прогнозування дат появи льодових явищ і вимагають врахування чинників, які відображають сучасні тренди термічного і льодового режимів річок.

### Контрольні запитання

1. Як змінюються у часі терміни установаження стійкого льодового покриву на початку XXI сторіччя?
2. Як змінюються у часі терміни скресання річок?
3. Як змінюються у часі терміни судноплавства?
4. Які атмосферні процеси (осциляції) впливають на льодовий режим річки Дністер?
5. Які атмосферні процеси (осциляції) впливають на льодовий режим річки Десна?



## **5 ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН ХАРАКТЕРИСТИК ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО ТАЛОГО ТА ДОЩОВОГО СТОКУ РІЧОК ЗА МОДЕЛЛЮ Є.Д. ГОПЧЕНКА – В.А. ОВЧАРУК**

Формування весняного водопілля відбувається під впливом двох груп факторів - метеорологічних (або кліматичних) та факторів підстильної поверхні. До першої групи відносяться, перш за все, радіаційний баланс території, температура повітря та ґрунту, опади. Сукупність цих факторів визначає інтенсивність сніготанення та водовіддачі й випаровування. Фактори підстильної поверхні, до яких відносяться рельєф місцевості, ґрунтовий та рослинний покрив, заболоченість та закарстованість водозборів, ступінь антропогенної діяльності та інше, переважно визначають втрати талих вод на інфільтрацію, поверхнєве затримання, а також трансформацію стоку на схилах та в русловій мережі.

Аналіз метеорологічних та кліматичних умов формування весняних водопіль показав, що наявні тенденції до зміни температури повітря, перш за все у холодний період року, дозволяють очікувати й суттєві зміни умов формування весняних водопіль на території рівнинної України; середні значення кількості опадів за холодний, теплий періоди та за рік в цілому змінилися дуже мало - вони досить стійкі у часі і знаходяться у межах кліматологічної стандартної норми. Що стосується накопичення максимальних запасів води у сніговому покриві на початок весняного водопілля, то на даний час значущі тенденції у їх хронологічному ході для рівнинної території України не виявлені.

З іншого боку, фактори підстильної поверхні потенційно можуть суттєво впливати на величини максимальних витрат води весняного водопілля. Зокрема, наявність лісу на водозборах рівнинної України збільшує величини максимальних запасів снігу на 21%; вплив карсту може проявлятися через збільшення тривалості схилового припливу, величина якого може збільшитися практично в 2 рази; вплив заболоченості, озерності та залісеності на характеристики схилового припливу не однозначний та потребує подальших досліджень на сучасних даних.

У вітчизняній і світовій практиці запропоновано велику кількість розрахункових схем і методик для визначення характеристик максимального стоку. Але з іншого боку, велика кількість формул свідчить і про те, що проблема розрахунків в області визначення характеристик паводків і водопіль ще далека від оптимального вирішення.

При будівництві інженерних споруд та їх експлуатації (мостових переходів, паводкозахисних дамб тощо) орієнтуються зазвичай на розміри паводків і водопіль тієї чи іншої ймовірності перевищення і, отже найбільш поширеними є стохастичні підходи до побудови теоретичних моделей формування максимального стоку річок. З іншого боку,

детерміністичний підхід дає змогу найбільш повно врахувати всі закономірності формування стоку.

Математичні моделі відіграють важливу роль в плануванні управління водними ресурсами і, отже, різні типи моделей з різним ступенем складності були свого часу розроблені та продовжують розроблятися вченими різних країн для цієї мети. В останні роки більш досконалими визнані концептуальні моделі з розподіленими параметрами та навіть моделі з використанням штучних нейронних мереж, які дають змогу з доволі високою точністю визначити стік на окремих водозборах, використовуючи велику кількість вихідної інформації, але для невивчених у гідрологічному відношенні річок такі моделі не застосовуються.

Діючи в межах всієї території колишнього СРСР рекомендації по розрахунку характеристик максимального стоку весняних водопіль опиралися на нормативні документи СН 435-72, а потім СНіП 2.01.14-83. В їх основу були покладені головним чином формули редуційного типу. Для визначення максимального стоку весняного водопілля в СНіП 2.01.14-83 рекомендована структура виду

$$q_{p\%} = \frac{k_0 h_{p\%}}{(F + b)^{n_1}} \mu \delta \delta_1 \delta_2 \delta_3, \quad (5.1)$$

де  $k_0$  – параметр, який характеризує дружність водопілля;  $h_p$  – розрахунковий шар стоку весняного водопілля ймовірністю перевищення  $P\%$ , мм;  $F$  – площа водозборів, км<sup>2</sup>;  $b$  – емпіричний параметр, який враховує зниження інтенсивності редуції модуля максимального стоку в області невеликих водозборів (змінюється від 1 до 10 км<sup>2</sup>);  $n_1$  – показник ступеня редуції відношення  $q_p/h_p$  в залежності від площі водозборів;  $\delta$  – коефіцієнт впливу озер і водосховищ на  $q_p$ ;  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – коефіцієнти зниження максимальних модулів стоку на залісених, заболочених та розораних водозборах, відповідно.

З недоліків, властивих (5.1), слід зазначити головний – включення в знаменник параметра  $b$ , який порушує фізичну сутність вихідного рівняння. Фізичним вимогам рівняння (5.1) відповідає лише у тундровій і лісотундровій зонах, а найбільші, причому досить суттєві, розбіжності між розрахунковими і фактичними даними про максимальний стік мають місце у степовій зоні та зонах посушливих степів і напівпустель. Отже, застосування для рівнинної території України, особливо для південної степової її частини, формули рекомендовані СНіП 2.01.14-83 для визначення максимальних витрат води в період весняного водопілля призводить до суттєвих неточностей, перш за все, внаслідок невідповідності фізичним вимогам в зонах недостатнього та достатнього зволоження.

Відомі роботи професора А.М. Бефані (1958) присвячені теорії розрахунків максимального стоку річок, головним чином, стоку паводків. Подальший розвиток теорія максимального стоку А.М. Бефані отримала в роботах його учнів, перш за все проф. Гопченка Є.Д. (причому не тільки для паводків, а й для весняних водопілля). Операторна модель Гопченка Є.Д. (2000) дозволяє окремо визначати характеристики схилового припливу (шар стоку за водопілля, тривалість припливу і часову нерівномірність припливу води зі схилів до руслової мережі) та врахувати природний процес трансформації опадів в русловий стік в структурі «схилловий приплив – русловий стік».

Професором Овчарук В.А. запропонований модифікований варіант операторної моделі (рис.5.1), який дає можливість враховувати «зміни клімату» безпосередньо по максимальних снігозапасах, опадах та коефіцієнтах стоку у період водопілля.

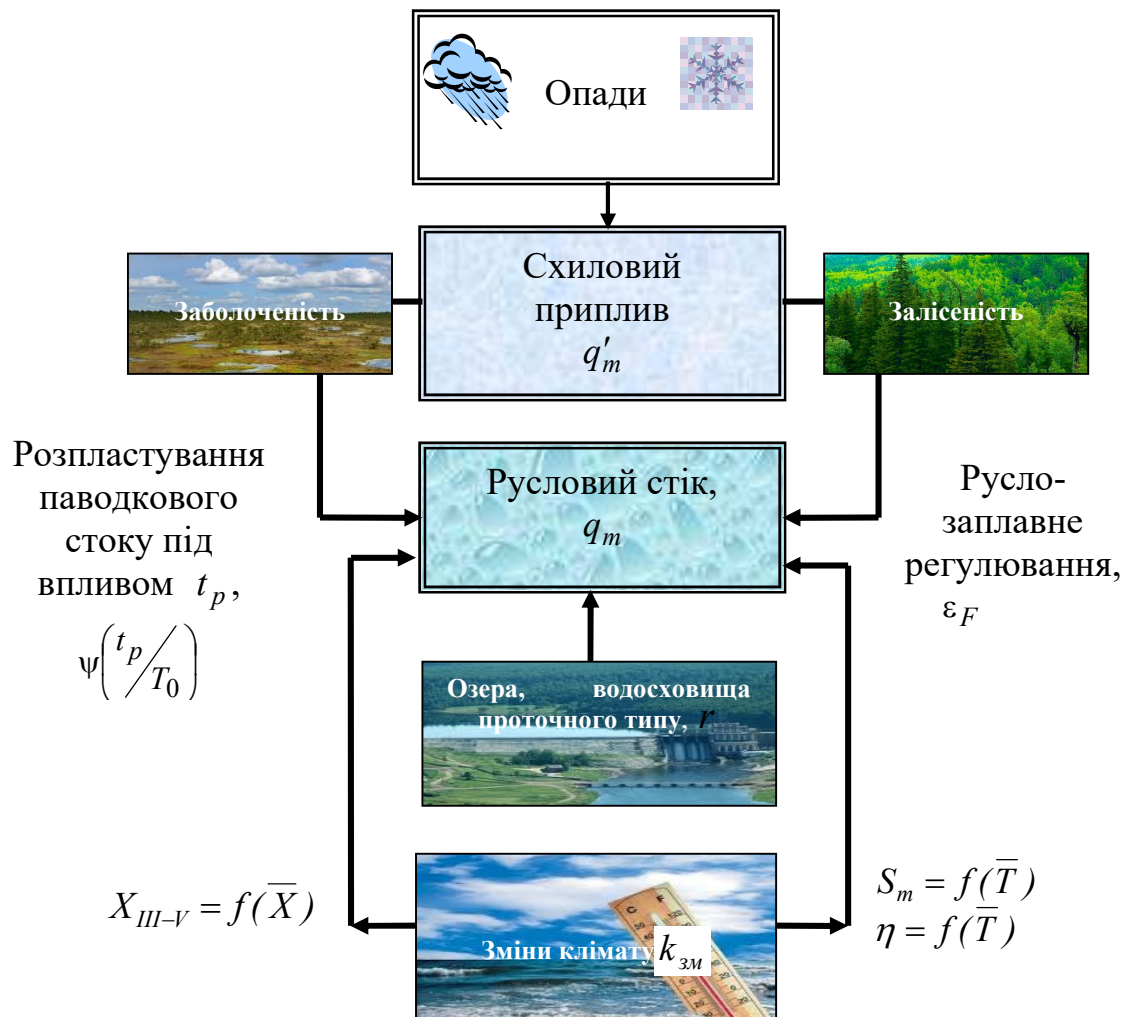


Рисунок 5.1 – Блок-схема формування максимального стоку весняного водопілля в умовах змін клімату.

Модифікований варіант операторної моделі пропонується в якості розрахункової методики для визначення на рівнинній території України максимального стоку невивчених у гідрологічному відношенні річок у період весняного водопілля, а розрахункове рівняння має вигляд:

$$q_p = q'_{1\%} \psi(t_p / T_0) \varepsilon_F r \lambda_p k_{зм}, \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2, \quad (5.2)$$

де  $r$  – коефіцієнт редукції  $q_m$  під впливом озер, водосховищ, ставків проточного типу;  $\varepsilon_F$  – трансформаційна функція, яка обумовлена русло-заплавним регулюванням;  $\psi(t_p/T_0)$  – трансформаційна функція, яка обумовлена відношенням між часом руслового добігання та тривалістю схилового припливу;  $\lambda_p$  – коефіцієнт переходу від опорної 1%-ої ймовірності перевищення до будь-якої іншої;  $q'_{1\%}$  – модуль схилового припливу, який розраховується за рівнянням

$$q'_{1\%} = 0,28 \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} (S_m + \Sigma X)_{1\%} \eta, \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2, \quad (5.3)$$

де  $(n+1)/n$  – коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу до руслової мережі;  $T_0$  – тривалість схилового припливу (у годинах);  $\eta$  – коефіцієнт стоку;  $S_m$  – максимальні снігозапаси до початку водопілля, мм;  $\Sigma X$  – кількість опадів від дати накопичення максимальних снігозапасів  $S_m$  до закінчення водопілля, мм;  $k_{зм}$  – коефіцієнт змін клімату, який розраховується за формулою

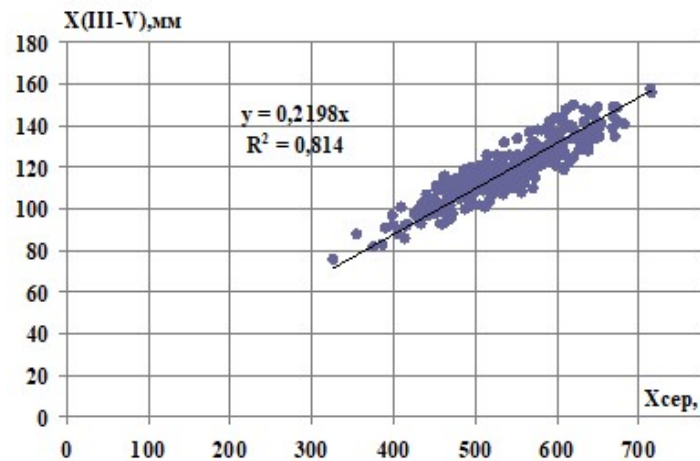
$$k_{зм} = \frac{((\bar{S}_m + \Sigma \bar{X}) \cdot \eta)_{\text{прогн.}}}{((\bar{S}_m + \Sigma \bar{X}) \cdot \eta)_{\text{сучасн.}}} \quad (5.4)$$

В формулі (5.4) прогностні значення середніх максимальних снігозапасів, опадів та коефіцієнтів стоку весняного водопілля визначаються з використанням залежностей, представлених на рис. 5.2, по прогностних значеннях температури та опадів за будь-яким сценарієм та моделлю. Відповідні сучасні значення тих же самих величин отримані за результатами розрахунків по наявних рядах спостережень.

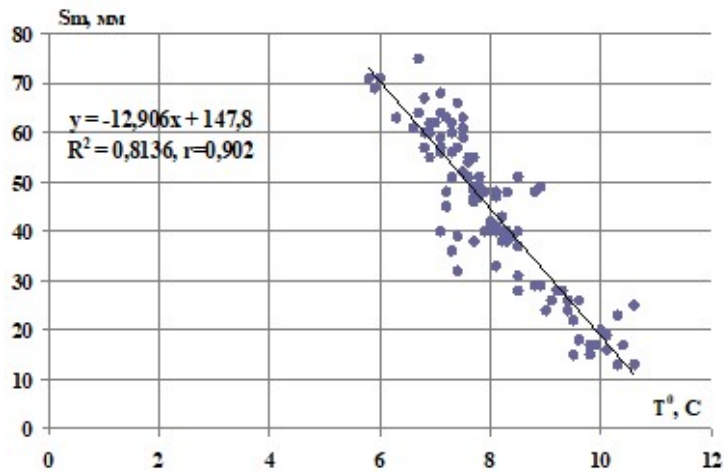
Якщо  $k_{зм} < 1,0$ , то буде відбуватись зменшення максимальних витрат рідкої повторюваності (1 раз на 100 років). Якщо  $k_{зм} > 1,0$ , то буде спостерігатися їх зростання.

За сценарієм помірних змін клімату RCP4.5 на малих та середніх річках Одещини очікується зменшення стоку в період весняного водопілля до **50%**, а за сценарієм швидких змін клімату RCP8.5 прогнозується зниження стоку весняного водопілля до **60%** (рис. 5.3).

а)



б)



в)

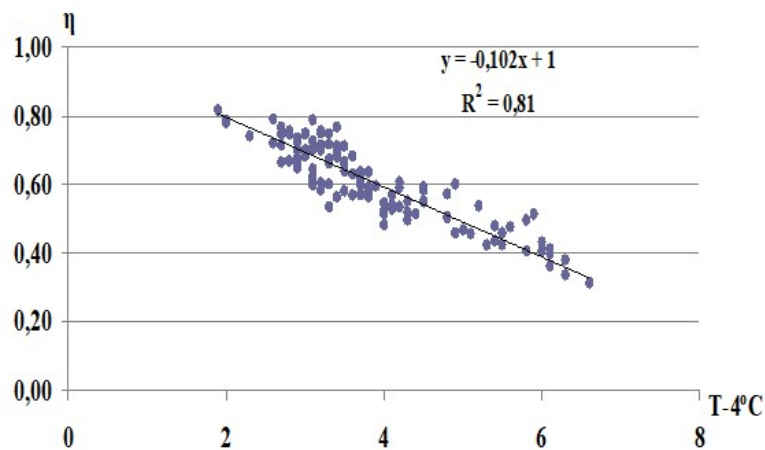
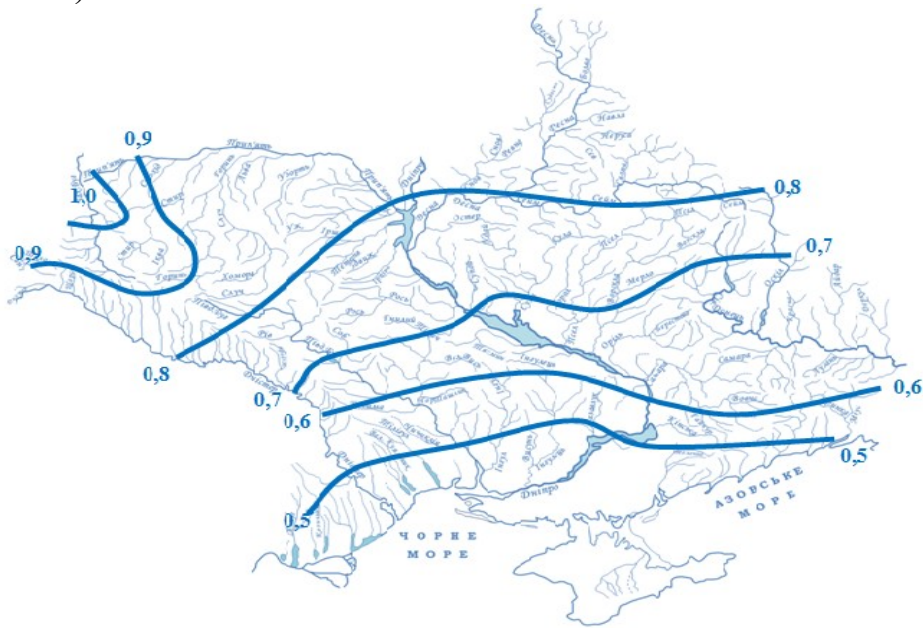


Рисунок 5.2 – Залежність середніх максимальних снігозапасів на початок весняного водопілля від середньобагаторічної річної температури повітря (а), опадів за період водопілля від їх середньобагаторічної річної величини (б) та коефіцієнтів стоку водопілля від середньобагаторічної річної температури повітря (в), (рівнинна територія України).

а)



б)



Рисунок 5.3 – Розподіл коефіцієнтів впливу змін клімату  $k_{зм}$  на максимальні модулі стоку весняного водопілля  $q_{1\%}$  по території рівнинної України (модель RASMO2, сценарій RCP4.5 (а) і RCP8.5 (б)) на період 2011- 2050 рр., відносно даних до 2010 р.

Тут слід зауважити, що зменшення стоку весняного водопілля не означає відповідного зменшення водних ресурсів в цілому. Скоріш за все, буде спостерігатися суттєвий внутрішньорічний перерозподіл водності. Наприклад, зростуть максимуми зимових паводків, які формуються підчас відлиг та зимових дощів. В Українських Карпатах можуть зрости максимуми дощових паводків теплого періоду року через збільшення

кількості опадів у окремі місяці.

Водночас залишається ймовірність виникнення **високих локальних дощових паводків** у теплий період року, які можуть призводити до суттєвих збитків, а іноді й до людських втрат. Прикладом такого небезпечного природного явища був паводок зливогого походження, який спостерігався у першій декаді вересня 2013 р. в басейні р. Когильник і охопив, за даними Одеського обласного управління водних ресурсів, приблизно 1400 км<sup>2</sup> його площі. За оцінкою фахівців цей дощовий паводок кваліфікувався як стихійне гідрологічне явище рідкісної ймовірності перевищення. В результаті відбулося пошкодження залізничного полотна на ділянці 150 м біля с. Березіно, підтоплені 110 будинків (у т.ч. зруйновано 11, близько сотні будинків підтоплені та 2 зруйновані в с. Перемога).

### Контрольні запитання

1. Назвіть головні чинники формування максимального стоку весняного водопілля.
2. Як впливає зростання температур холодного періоду на глибину промерзання ґрунту.
3. Як впливає поява додатних температур взимку на накопичення снігового покриву.
4. Як впливає потепління на коефіцієнти стоку весняного водопілля.
5. Як змінюється тривалість снігового покриву в умовах потепління.

## 6 ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА ГІДРОХІМІЧНИЙ СКЛАД ВОДИ ТА ВОДНІ БІОРЕСУРСИ

Одним з основних показників якості води важливим для багатьох водокористувачів є величина **мінералізації** води. Установлено, що мінералізація вод річок найбільш висока в період їх **живлення підземними водами** з глибоко розташованих водоносних горизонтів. Найчастіше це період межені. Чим більшу частку річкового стоку складають води глибоких водоносних горизонтів, тим вище мінералізація вод. Установлена досить тісна залежність мінералізації води від витрат води у річці (рис. 6.1). Такого типу залежності відкривають можливості прогнозування мінералізації від установлених за кліматичними сценаріями витрат води у роки різної водності та гідрологічні сезони.

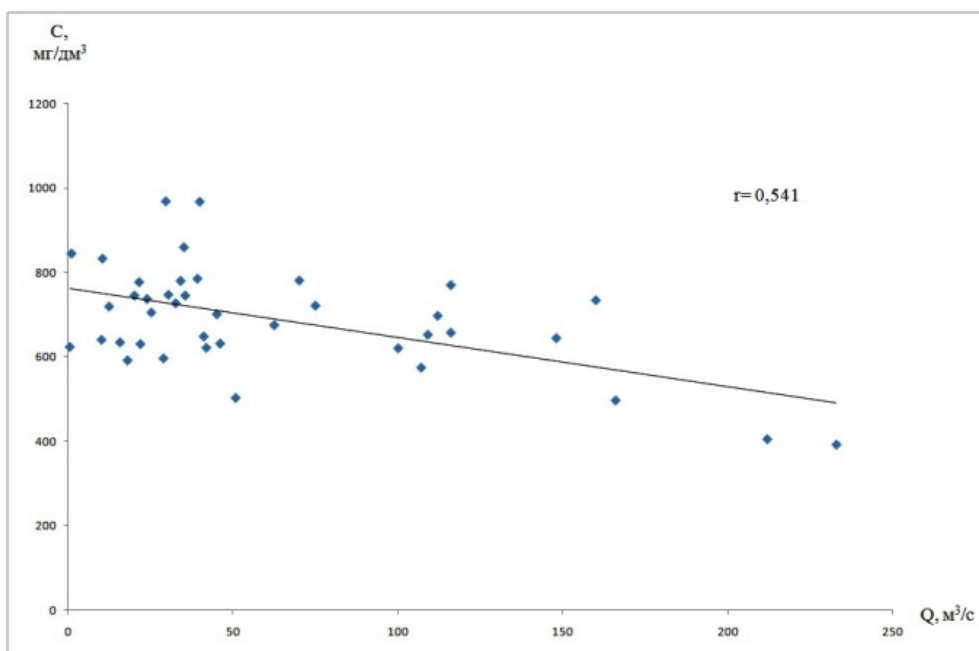


Рисунок 6.1 – Залежність річних значень мінералізації від витрат води в створі р. Псел – с. Запсілля (в межах села)

Аналіз розподілу мінералізації по сезонах дозволив встановити, що **в маловодні роки, коли протягом усього року переважає підземне живлення, суттєвих її змін не спостерігається**. Так, у маловодний 1992 рік (р. Ворскла - с. Чернеччина, об'єм річного стоку  $W = 236$  млн.  $m^3$ ) діапазон зміни мінералізації протягом року знаходився у межах 960 -1090  $mg/dm^3$  (рис.6.2). У багатоводний 1996 рік ( $W = 528$  млн.  $m^3$ ) в період зимової межені мінералізація становила 1070  $mg/dm^3$  ( $Q = 2,85 m^3/c$ ), а на піку весняної повені - лише 326  $mg/dm^3$  ( $Q = 133 m^3/c$ ), що підтверджує існування зв'язку між водністю річки і показниками мінералізації.



На мінералізацію вод можуть також впливати антропогенні чинники, наприклад **скиди мінералізованих шахтних вод у Донбасі**.

Велике значення для характеристики хімічного складу вод та їх якості мають **біогенні сполуки**, хоча їх кількість у природних умовах невелика і пов'язана з життєдіяльністю водних організмів. Основне значення мають мінеральні сполуки азоту (нітрити, нітрати, амоній), фосфору, кремнію, заліза, а також кисень. **Більшість біогенних речовин вживається фітопланктоном. Фітопланктон – рослинні організми (одноклітинні водорості).** Через це влітку, коли розвиваються водорості, біогенних речовин у воді менше ніж взимку. За отриманими даними найбільша кількість нітритів на річках Псел та Ворскла спостерігалася у зимовий сезон, а найменша - у літній сезон, коли інтенсифікується діяльність фітопланктону. **Нітрати містяться у воді у значно більшій кількості ніж нітрити**, змінюючись у середньому від 0 до 5 мг/дм<sup>3</sup>, оскільки вони є кінцевим продуктом процесу розпаду органічної речовини. Вони також споживаються фітопланктоном, тому в літній межений період їх дуже мало у воді, проте в зимову межень їх кількість зростає в десятки разів. **Найбільш стійкими з біогенних елементів є сполуки фосфору.** Вміст розчиненого мінерального фосфору водах досліджуваних річок зазвичай коливається незначно (0-0,2 мг/дм<sup>3</sup>) з максимумом в зимовий сезон. **Вміст заліза змінюється в часі значно більшою мірою внаслідок споживання його рослинами.** У літню межень кількість заліза у воді найменша внаслідок інтенсивного фотосинтезу і значної аерації води, що сприяє розвитку рослинності. У зимову межень споживання заліза рослинами припиняється, утворення окисного заліза з закисного в результаті припинення аерації практично не відбувається і тому вміст заліза помітно зростає.

**Вміст кремнію в водах річок досягає максимального значення у зимовий сезон, коли річки живляться переважно підземними водами, які вносять цей елемент у річкову воду. В літній сезон відбувається споживання кремнію діатомовими водоростями.** При цьому різниця між вмістом кремнію в зимову і літню межень досить велика. Наприклад, на р. Псел у м. Суми в зимову межень кількість кремнію становила 4,1 мг/дм<sup>3</sup>, навесні – 3,0 мг/дм<sup>3</sup>, а влітку його концентрація знижується до 1,4 мг/дм<sup>3</sup> (2003р). За розглянутий період (1991-2011рр.) гідрохімічних спостережень кількість випадків перевищення ГДК кремнію для питного водопостачання становила лише 15% , що спостерігалася у зимовий сезон.

**Дуже важливим показником забруднення природних вод є наявність в них розчиненого кисню, який впливає на біохімічні процеси, що протікають у водному середовищі.** Ступінь забруднення води також може характеризуватися біологічним показником забруднення (БПЗ), який являє собою відношення кількості біологічного споживання кисню за пентаду (БСК<sub>5</sub>), до перманганатної окиснюваності, яка в

меженний період має найменшу величину при зростаючому БСК. *Вміст кисню у воді значною мірою залежить від площі відкритої водної поверхні, швидкості течії води і турбулентного перемішування водних мас, температури води. Саме в меженний період більшість цих гідрологічних характеристик досягає найменших значень (особливо у зимовий сезон, коли річка вкривається льодом і течія уповільнюється) і, отже, не сприяє підвищенню вмісту кисню у воді (рис. 6.2). Чим довший зимовий меженний період, тим гостріше відчувається нестача кисню у воді. До того ж, зниження концентрації кисню у воді збільшує сприйнятливність організмів до впливу токсичних речовин, які потрапляють у водотоки, і різко зменшує здатність води до самоочищення.*

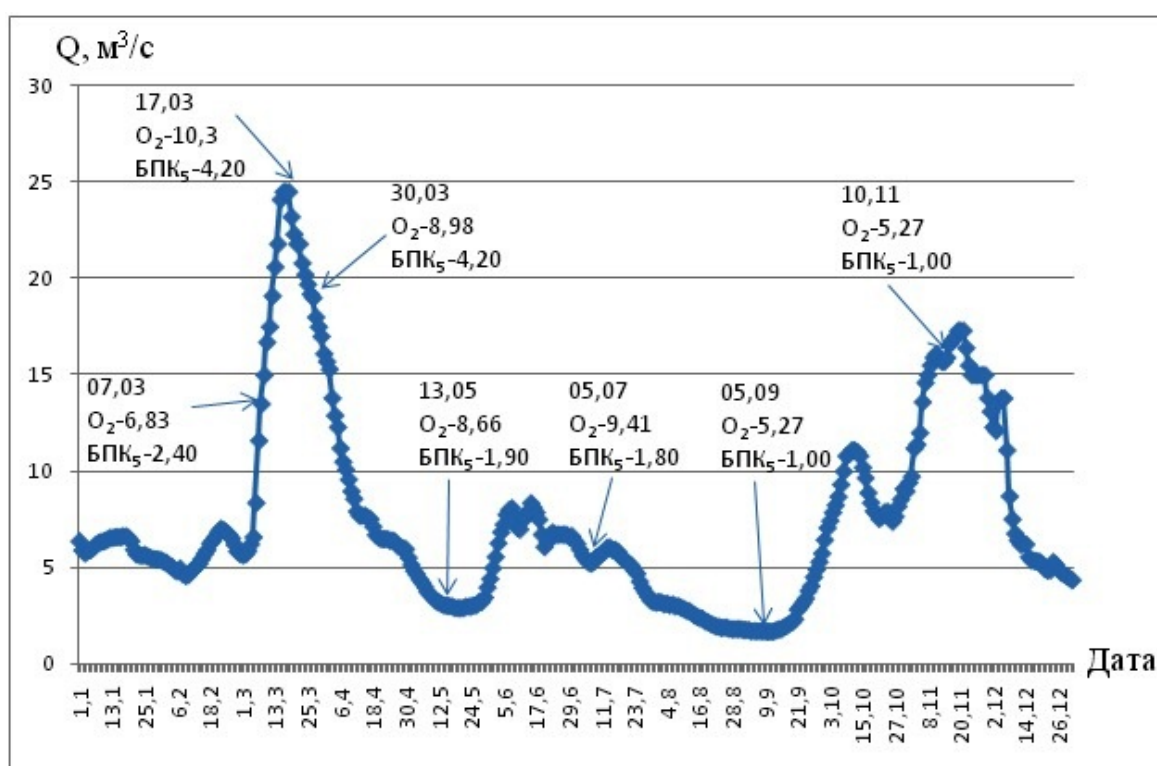


Рисунок 6.2 – Гідрограф за 1992 рік (маловодний) у створі р. Ворскла – с. Чернеччина з датами відбору проб та концентраціями кисню та БСК<sub>5</sub>

Наприклад, для річки Псел найбільші порушення кисневого режиму і замори риб мають місце у зимову межень. На річці Ворскла, особливо у її нижній течії, через малу водність (у порівнянні із річкою Псел) найбільш несприятливим для кисневого режиму є сезон літо (рис. 6.3).

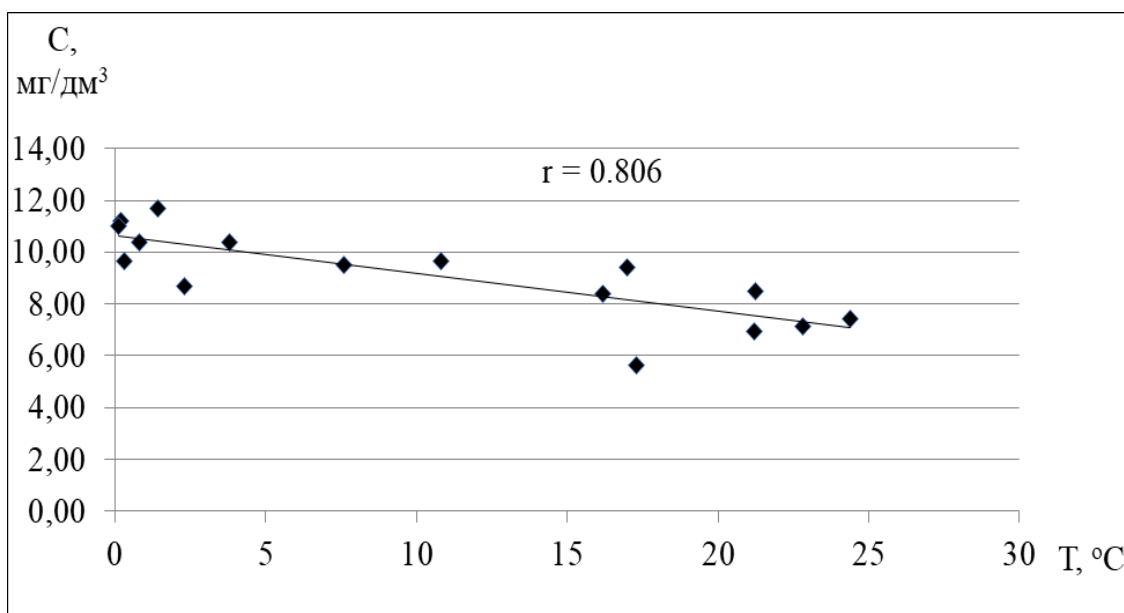


Рисунок 6.3 – Залежність концентрації кисню від температури води в створі р. Ворскла - м. Полтава (в межах міста)

При недостатній кількості кисню у воді в кілька разів знижується швидкість біохімічного розкладання нафтопродуктів, які потрапляють у річки з поверхні. Допустимий вміст нафтопродуктів у воді не повинен перевищувати  $0,05 \text{ мг/дм}^3$  для рибогосподарського водоспоживання. Концентрація нафтопродуктів значною мірою залежить від витрат води в річці (за інших рівних умов), та температур води. Взимку, коли температура води низька, розкладання нафтопродуктів відбувається повільно. Тому у зимову межень вплив нафтопродуктів на якість води буде найбільшим. Зростання температури води за рахунок зростання температури повітря буде сприяти зменшенню концентрації нафтопродуктів.

Значно порушують біологічні процеси у воді та погіршують її якість феноли, що потрапляють в річки зі стічними водами підприємств хімічної промисловості (лісохімічної, коксохімічної, сланцевої, анілінофарбової та ін.). Найбільш токсичними є одноатомні феноли. Їх гранично допустима концентрація (ГДК для питного водопостачання) у воді не повинна перевищувати  $1 \text{ мкг/дм}^3$ . Найбільш інтенсивне розкладання фенолів відбувається при високій температурі води і різко знижується при температурі води нижче  $7^\circ\text{C}$ . Тому в літній межений період, коли глибини на річках невеликі та річкові води добре прогріваються, вміст фенолів зменшується. Однак зниження концентрації кисню у воді затримує цей процес. Швидкість розкладання фенолів залежить також від цілої низки причин, що включають якісний і кількісний склад фенолів, наявність у воді органічних речовин, сірководню, кислих смол та інших хімічних речовин. Отже, в літній межений період вміст фенолів у

річках може значно коливатися. У зимовий сезон, коли температура води та вміст у ній кисню стають достатньо низькими, концентрація фенолів може збільшитися і зберігатися такою тривалий час. У цьому відношенні зимова межень є найбільш несприятливим з точки зору формування екологічного стану періодом. Установлено, що на річках Псел та Ворскла визначальним фактором зміни вмісту у воді фенолів є температура води. Наприклад, найбільші значення концентрації фенолів у створі р. Ворскла –с. Чернеччина спостерігалися у весняне водопілля і становили 0,012 мг/дм<sup>3</sup> на піку гідрографа (02.04.1994 р., температура води дорівнювала 0,6°C) і 0,019 мг/дм<sup>3</sup> (13.04.1994 р., температура води дорівнювала 1,2°C) на його спаді.

**На якість річкових вод великий вплив можуть чинити значні за розміром забори води для забезпечення промислових і комунально-побутових потреб міст, а також для задоволення попиту сільського господарства, особливо для зрошення. Інтенсивне використання річкових вод може призвести до істотної зміни в них біохімічних процесів, вплинути на температурний режим, викликати перевантаження річки стічними водами. Тому при здійсненні водозаборів з річок у меженний період необхідно залишати в них певну величину витрат води (четверту чи третю частину загального річного стоку, тобто витрату води, яка відповідає величині сталого підземного живлення річки), що відповідає санітарним вимогам. У цьому плані доцільно контролювати якісний стан річки в межень маловодних років.**

Наслідки кліматичних зміни включають до себе «потепління водойм». Зростання температури води може призвести до евтрофікації. Евтрофікація – це насичення водойми біогенними речовинами. Біогенні речовини у поєднанні із підвищеними температурами повітря стимулюють рост фітопланктону та синьозелених водоростей. Таке зростання потребує значних об'ємів кисню. Без доступу кисню розкладання рослин припиняється. Результатом є помутніння води, загибель бентосних (придонних) рослин, зниження концентрації розчиненого кисню, нестача його для риб та молюсків.

Зміни температурного режиму водойм можуть безпосередньо впливати на темпи зростання, схильність до захворювань гідробіонтів та викликати зміну термінів нересту. Гідробіонти – морські та прісноводні організми, які пристосовані до життя у певному водному середовищі (біотопі). Аномальне прискорення процесів метаболізму і розвитку, в умовах недостатнього забезпечення личинок адекватними кормами при переході на активне живлення, можуть супроводжуватися їх підвищеною смертністю на ранніх етапах онтогенезу, багаторазово знизити ефективність відтворення в природних екосистемах. (Онтогенез — індивідуальний розвиток особини від її зародження до смерті.)

Зменшення річкового стоку і надмірне його зарегулювання вже сьогодні призводить до **погіршення умов нересту туводних (аборигенних)** практично у всіх лиманно-гирлових комплексах півдня України. Втрата природних нерестовищ (заливних заплавних луків і плавневих озер дельти) в умовах скорочення або повної відсутності паводків багаторазово знижує ефективність природного відтворення, що призводить до масової розробки статевих продуктів плідників, масової загибелі личинок і молоді на нерестовищах.

Підвищення температури повітря та води, зростання випаровування з поверхні суші та водної поверхні призводить до зменшення річкового і материкового стоку. Це сприяє **зростанню солоності приморських водойм** (лиманів), наростанню евтрофікації, що супроводжується погіршенням умов нагулу гідробіонтів. **Зміна сольового і температурного режимів лиманних екосистем впливає на метаболічні реакції риб, тягне за собою глибокі фізіологічні зміни, пов'язані з умовами статевого дозрівання, відтворення і харчування.** Сьогодні відбувається корінна перебудова якісного складу і структури **іхтіоценозів** солонуватоводних лиманів і лагун півдня України, втрата їх продукційного потенціалу, пов'язана з ростом солоності і зміною термального режиму вод. *Іхтіоценоз є спільнотою риб, пов'язаних в кожен даний момент харчовими та іншими екологічними зв'язками, яка займає певну ділянку річки, озера або іншої водойми, що відрізняється від іншої складом іхтіофауни.*

Найбільшою нестабільністю в умовах глобального потепління характеризуються **естуарні (гирлові) екосистеми.** Зміна кліматичних умов супроводжується прогресуючим **підвищенням рівня моря, підкисленням вод і виникненням екстремальних погодних явищ.** Таким чином, глобальне потепління матиме помітні наслідки не тільки для рибного промислу, але і для аквакультури у внутрішніх водоймах та шельфовій зоні морів.

**Прогнозоване зростання вмісту вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) в морських і солонуватих акваторіях призведе до підкислення середовища (зниження рН), що позначиться, наприклад на фізіології двостулкових молюсків, відіб'ється на швидкості їх зростання, ефективності відтворення та якості раковин (мушлів).** В аквакультурі **підвищення кислотності вод призведе до масової загибелі личинок устриць при інкубації.** З іншого боку, зниження рН може прискорювати осідання личинок молюсків і темпи їх зростання, а також дозволить розширити широтний діапазон зони аквакультури. Вплив зростання концентрації CO<sub>2</sub> в морських і солонуватоводних акваторіях на мальків і дорослих риб буде менш вираженим, ніж на ембріони і личинок, у яких може спостерігатися сповільнення росту і розвитку.

В умовах зміни клімату значно зростає **загроза різних**

**паразитарних захворювань в аквакультурі.** Аквакультурою є вирощування деяких видів риб, їстівних моллюсків і ракоподібних на спеціальних фермах. Поширення і масштаби захворюваності об'єктів аквакультури паразитами і патогенними мікроорганізмами в умовах глобального потепління може позначитися наприклад на поширенні такої хвороби, як **вібріоз**, тому що бактерії роду *Vibrio* інтенсивно ростуть і розмножуються в теплих водах (з температурою більше 15°C) та з низькою солоністю (менше 25‰). З огляду на це, моделі потепління пов'язують з спалахами *Vibrio* у моллюсків та риб, особливо в регіонах з холодним і помірним кліматом.

Ще одна проблема, пов'язана з зміною глобального клімату – **інвазійні чужорідні види (ІЧВ) рослин і тварин**, які вважаються основною загрозою природному біорізноманіттю. Міжнародний союз охорони природи (МСОП) визначає їх вплив як «...колосальний, прихований і зазвичай необоротний ...». Потрапивши в природні екосистеми випадково або навмисно ІЧВ створюють загрозу для їх екологічної стабільності, пригноблюють, або витискають аборигенні види, через те, що їх чутливість до негативного впливу ІЧВ, такими як хижацтво, харчова конкуренція та ін., у край висока.

Результатом інвазії може бути **втрата біорізноманіття, передача хвороб гідробіонтам і людині**, економічні збитки та пошкодження інфраструктури.

**Зміна клімату (підвищення температури, танення крижаних щитів, зміна кількості опадів, засухи, хвилі спеки, посилення штормів та підвищення рівня моря) впливають на види тваринного світу, які не можуть впоратися із наслідками змін клімату, мігрують у пошуках інших умов і часто зникають. Швидкість зникнення видів через антропогенну діяльність у 1000 разів перевищує фонову швидкість.**

**Реакліматизація – штучне повернення організмів у місцевість, де вони мешкали раніше.**

**Акліматизація – пристосування організмів до нових умов, у які вони потрапили природним шляхом або були перенесені людиною з метою збагачення флори і фауни.**

Острів Калімантан у Індонезії (комарі (малярія) – ДДТ - таргани-ящірки - гусені – дахи - коти- пацюки – чумна паличка).

Розробка методики біотестування на макроводоростях. Біотестування - це експериментальне визначення впливу факторів на живі організми шляхом реєстрації змін того чи іншого біологічного показника. Відома велика кількість методів біотестування, але серед них стандартизованих небагато. Макрофіти є важливими екологічними елементами і тому можуть бути потенційно ключовими організмами для використання при тестуванні екологічного стану середовища. Більшість робіт проведено з оцінки впливу 15 нафтовуглеводнів на чорноморські

макроводорості наприкінці 70-х - початку 80-х минулого століття. Тестами у дослідженнях щодо впливу нафтопродуктів на чорноморську філофору служили: інтенсивність фотосинтезу, зміна кількості пігментів, зміна загальної маси талому та співвідношення різних його частин, тобто процеси зростання та відмирання водоростей; одним із показників служила активність окисного ферменту каталази. Встановлено, що вплив нафти на філофору не однозначний за ступенем та напрямом; найчастіше він негативний. Найменш стійкими до впливу нафти та нафтопродуктів є макроводорості на ранніх стадіях свого життєвого циклу. Розроблено тест із використанням зеленої водорості *Ulva pertusa* Kjellman, 1897 (актуальна назва – *Ulva australis* Areschoug, 1854), який забезпечує безліч практичних переваг у порівнянні з іншими методами, що використовуються в даний час. Інші види роду *Ulva* мають широкий діапазон географічного поширення та проходять подібні репродуктивні процеси. Вивчено можливість використання підводних квіткових макрофітів для біотестування донних відкладів прісних водойм. На відміну від макроводоростей квіткові рослини вкорінюються в м'яких ґрунтах, а не прикріплюються до твердих субстратів. Як біотести використовуються такі показники, як довжина пагонів, довжина коренів, кількість коренів. Однак всі розглянуті методи потребують наявності матеріальної бази як умови для утримання макрофітів, проведення експедицій для отримання посадкового матеріалу, тощо.

Концентрація хлорофілу є одним з найважливіших показників стану водних організмів екосистеми. Супутникове дистанційне зондування хлорофілу дозволяє спостерігати за станом водойми з високою часовою і просторовою роздільною здатністю.

Висновки: 1. Підвищену загибель китоподібних у Чорному морі, зокрема у водах України, спостерігали протягом 2022 року в період з кінця лютого по вересень, що співпадає з часом збройної агресії РФ проти України і бойових дій на морі. 2. Загибель китоподібних у водах України вдвічі вища середнього рівня, проте нижче, ніж у 2017 році. Максимум припав на травень і червень. 3. Незвичні риси подій – висока частка звичайного дельфіна, мала кількість або відсутність тварин з ознаками взаємодії зі знаряддями рибальства, висока кількість викидів живих тварин, наявність тварин, що викидалися живими і вони виживали. 4. За результатами аналізу даних і макроанатомічного дослідження не виключено жодну з початкових гіпотез щодо можливих причин загибелі, проте всі вони в цілому свідчать про руйнівний вплив дій РФ на стан популяції китоподібних. 5. Збитки, пов'язані із знищенням китоподібних, складають найбільшу частку загальної суми збитків, пов'язаних з шкодою, нанесенню морському середовищу військовими діями, тому коректна оцінка шкоди, заподіяної китоподібним, є принциповим питанням.

Результати проведених у 2019 році досліджень показали високий

рівень забруднення біологічних об'єктів токсичними металами, зокрема миш'яком, кадмієм і ртуттю. • Максимальна концентрація миш'яку в рапані (69,9 мг/кг), що перевищує ГДК на майже 30 разів, виявлено в листопаді 2019 року в районі біологічної станції ОНУ, підвищені концентрації (більше 2-4 ГДК) виявлені також у зразках рапанів в районі скиду стічних вод міста та порту Чорноморськ та в пробах мідій від біологічної станції ОНУ ім. • Один випадок перевищення ГДК у 1,8 рази концентрації кадмію в рапані в м. вересня 2019 року в зоні скиду стічних вод міста та порту Чорноморськ відбулося записані. • Концентрації ртуті перевищували ГДК у 2-2,5 рази в усіх біологічних об'єктах (мідії, Рапана, риба). • Серед органічних забруднювачів ГДК встановлено лише для гексахлорбензолу, гептахлору, сума 6 окремих ПХБ (28, 52, 101, 138, 153, 180), флуорантен і бенз(а)пірен. • Відсутність випадків перевищення ГДК концентрації гексахлорбензолу в біол об'єктів було зафіксовано. • Максимальна концентрація гептахлору (87,4 мкг/кг) виявлена у зразку раунду. бичок, вилонений в районі острова Зміїний. Також були високі концентрації (9-10 мкг/кг). зафіксовано у зразку рапани та бичка круглого з району ОНУ біол станція. • Перевищення ГДК на кількість 6 ПХБ виявлено лише в одній пробі Рапани в с. місце скиду з КОС міста та порту Чорноморськ. • Відсутність випадків перевищення ГДК концентрації флуорантену в біологічних об'єктах були виявлені. • Концентрації бенз(а)пірену перевищували ГДК лише в одній пробі Рапани.

### Контрольні питання

1. Як вплине потепління на вміст кисню у воді.
2. Як залежить вміст нафтопродуктів і фенолів від температури.
3. Чому вміст більшості біогенних речовин зростає у зимовий період.
4. Як впливає зростання температур води при потеплінні на частоту паразитарних захворювань риб.
5. Як впливає зростання температур води при потеплінні на частоту інвазії чужорідних видів.



## 7 ГІДРОЛОГІЧНІ ПОСУХИ В УМОВАХ ЗМІН КЛІМАТУ

Посуха – кліматичне явище стохастичної природи, що виникає внаслідок значного дефіциту опадів.

В останні роки істотно збільшилась кількість екстремальних явищ погоди, в тому числі й таких небезпечних як посухи. Наслідки впливу посух на стан водних ресурсів посилюються за рахунок зростання попиту на воду та через збільшення мінливості характеристик стоку в результаті змін клімату. Посуха є однією з головних природних причин соціальних, економічних та екологічних збитків.

Існують різні підходи до класифікації посух. Залежно від середовища, в якому спостерігаються ознаки дефіциту вологи, розрізняють атмосферні та ґрунтові посухи. У іноземній літературі, орієнтованій на моніторинг посух, поширена більш детальна класифікація, яка ураховує умови їх формування та наслідки. Посухи, які розглядаються як прояв кліматичної мінливості, поділяються на такі категорії: метеорологічна, сільськогосподарська, гідрологічна, соціально-економічна. У роботах закордонних вчених виділяються чотири категорії посух:

- метеорологічна, яка супроводжується відхиленням кількості опадів від норми протягом тривалого проміжку часу і є головною причиною формування межені річок;
- гідрологічна посуха відображає вплив метеорологічної посухи, її основною рисою є формування вираженого дефіциту поверхневого і підповерхневого запасу води, зокрема зменшення або припинення припливу підземних вод до русла річки під час межені;
- сільськогосподарська посуха полягає у формуванні дефіциту вологи у ґрунті, необхідної для розвитку рослин у певний момент часу;
- соціально-економічна посуха пов'язується із співвідношенням запасу води у регіоні та попитом на неї.

Дефіцит запасу води для різних цілей виникає у період межені. Низький стік є елементом межені. Індексом (кількісним показником) низького стоку є мінімальний стік.

Одним із головних чинників збільшення кількості посух, їх тривалості та інтенсивності більшість вчених вважають зміни клімату, які спостерігаються в останні декілька десятиріч, що підтверджують результати дослідження Міжурядової групи експертів по змінах клімату.

Протягом посухи спостерігається тривала (багатоденна, багатомісячна, багаторічна) суха погода, часто при підвищеній температурі повітря, з відсутністю чи вкрай незначною кількістю опадів, яка призводить до виснаження запасів води (вологи) у ґрунті та різкого зниження відносної вологості повітря. У результаті посух створюються несприятливі умови для розвитку рослин, формування стоку у річках, внаслідок чого виникає дефіцит водоспоживання. З екологічної точки зору,

наслідками посух є неврожаї сільськогосподарських культур, деградація луків, зниження приросту деревини, загибель худоби та різкі коливання чисельності мікроорганізмів.

Посуха супроводжується посушливими явищами, такими як тривале бездощів'я, висока температура повітря, суховії, атмосферна та ґрунтова посухи.

Бездощовий період (бездощів'я) є інтервалом часу, в який протягом десяти та більше днів не спостерігаються опади або їх добова кількість не перевищує 1 мм. *Тривале бездощів'я є передвісником посухи.* Часто у ці періоди спостерігаються суховії. *Бездощовий період тривалістю понад 10 днів вважається посушливим.*

Суховій розглядається як стан атмосфери, за якого простежується повільне, зі швидкістю 3-5 м/с, перенесення сухого, надмірно теплого повітря (відносна вологість 30% та нижче, а температура 25 °С – та вища). Поєднання суховію з бездощовим періодом протягом декількох днів зумовлює атмосферну посуху.

Атмосферною посухою у місцевості з помірним кліматом є стан атмосфери з тривалим бездощів'ям, істотним зменшенням опадів, що супроводжується підвищеною інсоляцією та високою температурою повітря. Атмосферна посуха певної тривалості зумовлює ґрунтову посуху.

Ґрунтова посуха може спостерігатись на полях, які неадаптовані до посушливого клімату як без рослин, так і з рослинним покриттям. Внаслідок недостатньої вологості ґрунту, надлишкової інсоляції та надходження тепла відбувається істотне зниження транспірації і продуктивності порівняно із сприятливими умовами.

*Поєднання атмосферної та ґрунтової посух в окремих випадках визначають як загальну посуху.*

Бездощові періоди пов'язані, головним чином, зі сталими антициклонами та їх відрогами, які поширюються на центральну та південну частини України. Тривалі бездощові періоди зумовлені антициклонами та ядрами високого тиску у масах арктичного повітря, що переміщуються з півночі. Менш тривалі бездощові періоди пов'язані з антициклонами, що рухаються із заходу й формуються у повітрі помірних широт, охоплюючи всю країну.

Аналіз просторово-часового розподілу посух різних категорій (помірні, інтенсивні, екстремальні) для території України, виконаний в ОДЕКУ показав, що в період 1951–1980 рр. посухи в основному формувались в північно-східних областях України (Харківській, Чернігівській, Сумській), а протягом 1981–2010 рр. осередки максимальних значень знаходились в південних та південно-західних районах, а саме у Чернівецькій та Миколаївській областях.

Один з найпоширеніших підходів до аналізу посушливості заснований на застосуванні спеціальних індексів, які повинні відображати метеорологічні явища й умови, які передують виникненню сільськогосподарської або гідрологічної посухи. Практично усі існуючі індекси посух базуються на порівнянні наявних запасів води (причому основною складовою є опади) з втратами води на випаровування. Випаровування визначається, головним чином, припливом сонячної радіації, температурою повітря або іншими кліматичними змінними. Один з перших і, ймовірно, найпростіших індексів був запропонований Мартонні. Індекс  $\alpha$  визначається за великий період спостережень і розраховується таким чином:

$$\alpha = \frac{X}{10 + T}, \quad (7.1)$$

де  $X$  – середнє річне значення опадів, мм;

$T$  – середнє річне значення температури повітря, °С.

Значення  $\alpha < 15$  характерні для аридних зон.

У сучасних оцінках показників посушливості частіше використовуються дані про опади та максимально можливе випаровування, яке також називають потенційним випаровуванням або потенційною евапотранспірацією ( $PET$ ). Під цією величиною слід розуміти максимальну кількість води, яка могла б випаруватися в даних кліматичних умовах з поверхні суші, покритої рослинністю, при наявності достатнього запасу вологи. За формулою Торнтвайта,  $PET$  виражається як функція сум температур за 12 місяців. Якщо кількість середньорічних опадів менша  $PET$ , то розглянутий район класифікується, як щонайменше, напіваридний.

За рекомендаціями ЮНЕСКО, ступінь аридності визначається наступними співвідношеннями:

$X/PET < 0,03$  – гіпераридна зона;

$0,03 < X/PET < 0,20$  – аридна зона;

$0,20 < X/PET < 0,50$  – напіваридна зона,

де  $X$  – шар середньорічних опадів;

$PET$  – потенційне випаровування.

Неважко провести аналогію між величиною  $PET$  та максимально можливим випаровуванням або теплоенергетичним еквівалентом  $E_m$ , який розраховується за даними про додатні складові теплового балансу підстильної поверхні і трактується як максимально можливе випаровування з поверхні суші, яке мало б місце, якщо на процес випаровування були б витрачені всі теплоенергетичні ресурси клімату. За

величиною  $\beta_X = \frac{\bar{X}}{\bar{E}_m}$ , також може бути визначено ступінь посушливості (зволоженості) території

$$\begin{aligned} \beta_X \geq 1,0 & - \text{зона надмірного зволоження;} \\ 0,8 \leq \beta_X < 1,0 & - \text{зона достатнього зволоження;} \\ 0,5 \leq \beta_X < 0,8 & - \text{недостатнього зволоження.} \end{aligned}$$

Властивості атмосферної посухи у період активної вегетації рослин описуються гідротермічним коефіцієнтом Г.Т. Селянинова (ГТК) :

$$ГТК = \frac{10 \sum X}{\sum T}, \quad (7.2)$$

де  $\sum X$  – кількість опадів за період активної вегетації, мм;  $\sum T$  – сума додатних температур повітря за період активної вегетації між датами переходу її через 10°C навесні та восени.

При значеннях  $ГТК = 0,7 \div 1,0$  розрахунковий період відносять до категорії помірної посухи,  $ГТК = 0,5 \div 0,7$  – до суворої посухи,  $ГТК = 0,3 \div 0,5$  – до дуже суворої посухи.

Згідно із коефіцієнтом ГТК на території Північно-Західного Причорномор'я найбільш часто спостерігаються помірні посухи, частота появи посух зростає у напрямку з північного заходу на південний схід (табл. 7.1).

Таблиця 7.1 – Частота появи (%) посух різної суворості, згідно ГТК

Метеостанція	Категорія посухи		
	помірна	сувора	дуже сувора
Любашівка	40	25	9
Баштанка	45	22	11
Одеса	45	30	12
Ізмаїл	33	35	14

Стандартизований індекс опадів (Standardized Precipitation Index SPI). SPI розробили та запровадили з метою виявлення та моніторингу посухи, використовуючи дані щомісячних опадів. Він призначений для визначення періодів посухи, а також суворості посухи на різних масштабах часу, таких як 1, 3, 6, 9 та 12 місяців. Однак об'єктивний вибір найкращого кроку за часом залежить від мети аналізу посухи. Як повідомляє Всесвітня метеорологічна організація, SPI базується на ймовірності опадів за будь-який часовий період. Переваги: єдиний вхідний параметр – опади;

обчислюється для різних періодів часу; надає інформацію про ранне попередження і може бути використаний для оцінки тяжкості посухи; доступна повна процедура оцінки SPI. Під стандартизованими опадами розуміють відхилення їх величини для певного періоду часу від середньої багаторічної величини, поділене на середньоквадратичне відхилення, тобто використовуються нормовані величини. Далі цей індекс було модифіковано залученням поняття про потенціальне сумарне випаровування  $PE$ , після чого розрахований індекс дістав назву стандартизований індекс опадів та сумарного випаровування (СІОСВ) або (SPEI).

SPEI використовує основу SPI, але включає температурну складову, що дозволяє індексу враховувати вплив температури на розвиток посухи за допомогою базового розрахунку водного балансу. SPEI має шкалу інтенсивності, в якій обчислюються як позитивні, так і негативні значення, ідентифікуючи вологі та сухі події. Він може бути розрахований на масштабах часу від 1 місяця до 48 місяців і більше. Вхідні параметри: щомісячні дані опадів та температури. Переваги: включення температури разом із даними про опади, що дозволяє SPEI враховувати вплив температури на ситуацію із посухою; застосовується для всіх кліматичних режимів; результати є порівняльними, оскільки вони стандартизовані; SPEI ідеальний показник при розгляді впливу зміни клімату на виході моделі в різних майбутніх сценаріях. Недоліки: вимога до серійно повного набору даних як для температури, так і для опадів; SPEI щомісячний індекс, тому він не в змозі бути швидко визначеним, коли ситуації із посухою стрімко розвивається

Розрахунок  $PE$  є складним і потребує багатьох параметрів, таких як температура поверхні ґрунту, вологість повітря, радіація, яка надходить до ґрунту, тиск водяної пари, потоки прихованого та відчутного тепла між ґрунтом та атмосферою тощо. Але було показано, що з метою залучення  $PE$  до визначення індексів посухи можна використовувати простіший підхід і це не позначиться істотно на розрахованих індексах. Було запропоновано для розрахунку потенційного випаровування, яке позначене як  $PE$  (у мм), застосувати метод Торнвейта, за яким  $PE$  представляється в залежності від середньомісячної температури повітря, а саме

$$PE = 16K \left( \frac{10T}{I} \right)^m, \quad (7.3)$$

де  $T$  – середньомісячна температура повітря, °C;  $I$  – індекс теплоти, який розраховується як сума 12 середньомісячних величин індексу  $i$ , а останній одержується з середньомісячних температур повітря наступним чином

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514}, \quad (7.4)$$

де  $m$  – коефіцієнт,  $m = 6.75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,492$ ;  $K$  – поправочний коефіцієнт, що визначається як функція широти та календарного місяця.

Середнє значення SPEI дорівнює нулю, а стандартне відхилення - 1. SPEI є стандартизованою змінною, і він може порівнюватися з іншими значеннями SPEI у часі і просторі.

Установлена класифікація посух в залежності від значення, яке прийняла величина SPEI (табл. 7.2).

Таблиця 7.2 – Класифікація значень SPEI

Значення SPEI	Категорія періоду	Категорія посухи
$SPEI \geq 2,00$	Вкрай вологий	
$1,50 \leq SPEI \leq 1,99$	Дуже вологий	
$1,00 \leq SPEI \leq 1,49$	Помірно вологий	
$0 \leq SPEI \leq 0,99$	Близький до нормального	
$0 \geq SPEI \geq -0,99$	Близький до нормального	Слабка посуха
$-1,00 \geq SPEI \geq -1,49$	Помірно сухий	Помірна посуха
$-1,50 \geq SPEI \geq -1,99$	Дуже сухий	Інтенсивна посуха
$SPEI \leq -2,00$	Вкрай сухий	Екстремальна посуха

Процедура визначення SPEI базується на обчисленні середньомісячних різниць між опадами та потенціальним сумарним випаровуванням і впроваджена у міжнародну практику з 2009 року. Наявність та інтенсивність посухи визначаються відповідно до значень SPEI, представлених в табл. 7.2.

Виявлено, що найбільш тривалі та суворі посухи спостерігались протягом 1981–2010 рр. Зосереджені вони в основному над південно-західними та західними регіонами України. Тривалість і суворість посух протягом 1951–1980 рр. була дещо меншою й розташовувались вони на півночі та північному сході країни. При цьому зі збільшенням масштабу часу спостерігалось істотне зростання значень максимальних величин вказаних характеристик всіх категорій посух.

**Маловоддя або гідрологічна посуха** – це період у гідрологічному режимі водних об'єктів з малими і дуже малими витратами води, формування та тривале утримання яких має небезпечний вплив на сектори економіки, об'єкти господарювання, життєдіяльність населення та навколишнє природне середовище.

Формування маловоддя (гідрологічної посухи) ускладнює та

обмежує забезпечення водою населення, галузей економіки, ускладнює нормальне функціонування водогосподарських і гідроенергетичних комплексів, питних та промислових водозаборів, інших значних об'єктів господарювання, обмежує виробіток гідроенергії, може зумовити встановлення лімітів на водокористування, негативно впливає на життєдіяльність населення та екологічну ситуацію на водних об'єктах.

Маловоддя, як правило, спостерігається у період межені. Характеристиками низького стоку у період маловоддя є характеристики мінімального стоку.

Мінімальний стік є найменший за величиною річковий стік, що звичайно спостерігається під час межені, при цьому виділяють:

- добові та середні місячні витрати води із поділом їх на зимові та літні;
- середні багаторічні значення добових та середніх місячних витрат води;
- мінімуми різної забезпеченості
- абсолютний мінімум – найменша витрата води за період спостережень (синонім – низький стік).

«Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя (гідрологічну посуху) на водних об'єктах суші України» встановлює та регламентує діяльність гідрометеорологічних організацій, в тому числі й мережі спостережень, в період загрози настання та формування маловоддя (гідрологічної посухи) на водних об'єктах суші України.

Оцінку настання (загрози настання) маловоддя виконують УкрГМЦ, ГМЦ ЧАМ, Харківський, Львівський РЦГМ, Закарпатський, Чернівецький, Волинський ЦГМ, Дунайська ГМО по водних об'єктах зон гідропрогностичної відповідальності відповідно до «Розподілу обов'язків між гідрометеорологічними організаціями ДСНС України зі складання і випуску гідрологічних прогнозів (консультацій) та попереджень (оповіщень) по водних об'єктах України» та інші гідрологічні організації в межах своєї зони відповідальності (при необхідності). Порядок оцінки та інформування про маловоддя (гідрологічну посуху) у період літньо-осінньої межені наведені у табл. 7.3.

Прогноз настання посухи у меженний період (червень-листопад) дається таким чином: по закінченню місяця (не пізніше 2 липня, 2 серпня, 2 вересня, 2 жовтня, 2 листопада, 2 грудня) обчислюють середні місячні витрати води річок у створах гідрологічних постів за минулий місяць та оцінюють їх по відношенню до середньої багаторічної водності відповідного календарного місяця, використовуючи при цьому останні опубліковані дані БДС.

Таку ж оцінку водності виконують за 15 діб поточного місяця меженого періоду порівняно з місячною нормою.

За результатами розрахунків та з урахуванням водності попередніх місяців встановлюють факт настання маловоддя.

Таблиця 7.3 – Визначення критеріїв маловоддя

Критерії та коротка характеристика
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Дуже малі</b>, забезпеченістю 95 % і більше, <b>максимальні витрати води (приплив до водосховищ)</b> під час весняного водопілля, що може ускладнювати наповнення водосховищ, експлуатацію гідроенергетичних об'єктів і споруд, призвести до ускладнення чи припинення роботи водозаборів, насосних станцій, до погіршення екологічної обстановки тощо – <b>основний критерій</b>.</li> <li>- <b>Об'єм весняного водопілля</b> великих річок (Дніпро, Десна, Прип'ять, Дністер, Південний Буг, Сіверський Донець), об'єм весняного припливу води до головних водосховищ України (Дніпровського каскаду, Дністровського, Червонооскільського, Печенізького) забезпеченістю 95 % і більше, що може ускладнити процес наповнення й експлуатації водосховищ, гідроенергетичних, водогосподарських споруд, призвести до погіршення екологічної ситуації та якості води - <b>основний критерій</b>.</li> <li>- <b>Середня місячна витрата води</b> у меженний період та у весняний період, (при відсутності або невираженості водопілля) – 20 % і менше норми відповідного місяця тривалістю 1 місяць та більше – <b>основний критерій</b>.</li> <li>- <b>Середня місячна витрата води</b> у меженний період та у весняний період (при відсутності або невираженості водопілля) – 20 % норми наймаловоднішого місяця літньо-осіннього періоду (періоду відкритого русла) тривалістю 1 місяць та більше – <b>допоміжний критерій</b>.</li> <li>- Досягнення, утримання значення <b>екологічної витрати води</b>, яка є критичним показником для функціонування екосистеми річки, та зменшення нижче неї упродовж 1 місяця і більше, незалежно від фази гідрологічного режиму/періоду року – <b>допоміжний критерій</b></li> <li>- <b>Пересихання (відсутність стоку)</b> упродовж 1 місяця і більше.</li> </ul>

В критичних ситуаціях (при утриманні маловоддя упродовж 1 та більше місяців) додатково виконують оцінку місячної водності порівняно з середньою за багаторічний період витратою наймаловоднішого місяця року та з екологічною витратою води. Значення екологічних витрат води обчислюються як 75% середньої витрати наймаловоднішого місяця меженного періоду року 95% забезпеченості (за об'ємом річного стоку). Розраховані величини екологічних витрат гідропрогностичні організації обов'язково погоджують з ВГП УкрГМЦ.



### **Контрольні запитання**

- 1 Дати визначення метеорологічної посухи.
- 2 Дати визначення гідрологічної посухи.
- 3 Дати визначення соціально-економічної посухи
- 4 Принцип побудови індексів посушливості
- 5 Дати визначення маловоддю або гідрологічної посухи.

## 8 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛІ «КЛІМАТ-СТІК»

Модель «клімат-стік» складається з двох частин. Перша частина призначена для розрахунків характеристик природного (непорушеного водогосподарською діяльністю річного стоку) на базі метеорологічних даних. Теоретичною основою моделювання є рівняння водно-теплового балансу замкненого водозбору у модифікації В.С. Мезенцева, адаптоване для умов України в Одеському державному екологічному університеті професорами Гопченко Є.Д. та Лобода Н.С. Результати застосування цієї частини моделі до розрахунків водних ресурсів України були оприлюднені у міжнародних виданнях ще наприкінці 90-х років минулого століття.

Друга частина моделі «клімат-стік» присвячена визначенню побутового (перетвореного водогосподарською діяльністю) річного стоку. Теоретичною основою цієї частини слугує рівняння водогосподарського балансу водозбору, представлене у ймовірнісному виді.

Перевагою моделі є те, що на вході в неї використовуються метеорологічні дані. Ця обставина дозволила використовувати у моделі «клімат-стік» метеорологічні дані сценаріїв змін глобального та регіонального клімату.

### 8.1 Теоретичні основи розрахунків характеристик річного стоку в природних умовах

Теоретичним базисом моделі «клімат-стік» при її застосуванні до розрахунків природного річного стоку є метод водно-теплового балансу. У методі розглядаються сумісно рівняння водного та теплового балансів ділянки суші, які містять у собі загальну складову – випаровування з поверхні суші.

Диференціальне рівняння водно-теплового балансу ділянки суші має такий вигляд

$$\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} + \frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = 1. \quad (8.1)$$

де

$$\beta_H = \frac{H}{E_m}; \quad \beta_E = \frac{E}{E_m}; \quad \beta_Y = \frac{Y}{E_m}; \quad (8.2)$$

де  $H$  – характеристика ресурсів зволоження;

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

$E$  – випаровування з поверхні суші;

$Y$  – стік з ділянки суші.

Граничні умови складових (8.2) є такими

$$0 \leq \beta_E \leq 1 \text{ при } 0 \leq \beta_H \leq \infty \text{ та } 0 \leq \beta_Y \leq \beta_H \leq \infty. \quad (8.3)$$

Методика розрахунків природного річного стоку для умов України на базі методу водно-теплого балансу водозбору розроблена в ОДЕКУ під керівництвом професорів Є.Д. Гопченка та Н.С. Лободи.

Результуюче рівняння водно-теплого балансу, отримане в результаті наближеного вирішення рівняння (8.1) записується у такий спосіб

$$Y = H - E_m \left[ 1 + \left( \frac{H}{E_m} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (8.4)$$

де  $H$  – характеристика зволоження території (мм);

$Y$  – характеристика стоку (мм);

$E_m$  – максимально можливе випаровування з поверхні суші (мм);

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

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

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

$$E_m = \frac{R^+ + P^+ + (B_1 - B_2)}{L}, \quad (8.5)$$

де  $R^+$  – позитивна (прибуткова) частина радіаційного балансу;

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

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

$L$  – «приховане» тепло пароутворення;

$LE$  – витрата тепла на випаровування.

Слід зазначити, що максимально можливе випаровування  $E_m$  завжди більше величини випаровування  $E$  з поверхні суші, яке розраховується за формулою

$$E = E_m \left[ 1 + \left( \frac{H}{E_m} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (8.6)$$

де  $E$  – величина випаровування з поверхні суші.

Таким чином, «теплоенергетичний еквівалент» або максимально можливе випаровування  $E_m$  є величиною, яка за своїм фізичним змістом близька до величини  $E_0$  – випаровуваності, яку також інтерпретували як максимально можливе випаровування. Поняття випаровуваності  $E_0$  багатьма авторами представлялась як верхня межа випаровування, але інтерпретувалася по-різному: «випар зі зволоженої поверхні» (М.І. Будико); «випар з водної поверхні при тій же комплексі метеорологічних умов, що і над сушею» (Н.А. Багров); «випар з поверхні полів, вкритих рослинністю, коли вологість ґрунту близька до найменшої польової вологоємності» (А.Р. Константінов). На відміну від інших авторів В.С. Мезенцеву вдалося надати однозначний фізичний зміст поняттю «випаровуваність».

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

$$w_1 - w_2 = 0, \quad (8.7)$$

є справедливим запис

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E}_m \left[ 1 + \left( \frac{\bar{X}}{\bar{E}_m} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (8.8)$$

де  $\bar{Y}, \bar{X}, \bar{E}_m$  – середні багаторічні величини річного стоку, опадів та теплоенергетичного еквівалента, відповідно;

$n$  – параметр, який інтегрує вплив фізико-географічних умов на формування стоку і приймається рівним 3;

Для багаторічного періоду також виконується умова

$$B_1 - B_2 = 0, \quad (8.9)$$

що дозволяє прийняти

$$E_m = \frac{R^+ + P^+}{L}. \quad (8.10)$$

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

$$\bar{E}_m = 13,3 \sum_V^{IX} \bar{T}_M - 307, r = 0,94; \quad (8.11)$$

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

$\sum_V^{IX} \bar{T}_M$  – сума норм середніх місячних температур повітря за літній період (із травня по вересень, включно);

$r$  – коефіцієнт кореляції, який характеризує тісноту кореляційного зв'язку між значеннями максимально можливого випаровування та температурами повітря.

Норма річного стоку  $\bar{Y}$ , розрахована за (8.8), визначається кліматичними чинниками формування стоку – нормою річних опадів  $\bar{X}$  й нормою максимально можливого випаровування  $\bar{E}_m$ , які підкоряються закону географічної зональності та представляються у вигляді карт ізоліній. Величини стоку, розраховані за метеорологічними даними з використанням рівнянь (8.4) або (8.8), отримали назву «кліматичного». Норма кліматичного стоку, отримана за рівнянням (8.8), у подальшому позначена як  $\bar{Y}_K$ .

Кarti ізоліній середніх багаторічних величин (норм) річних опадів, максимально можливого випаровування та розрахованого за (8.8) річного кліматичного стоку (рис. 8.1) були побудовані на топографічній основі 1:500000 для території України для кліматичних умов минулого сторіччя, коли вплив змін глобального клімату ще не набув значущості.



Рисунок 8.1 – Просторовий розподіл норм річного кліматичного стоку (мм) на території України за метеорологічними даними до 1989р.

При побудові карт ізоліній норм річного кліматичного стоку значення  $\bar{Y}_K$  визначалися за даними метеорологічних станцій. На карті ці значення відносилися до точок, які відповідають географічному положенню кожної з розглянутих метеорологічних станцій. При визначенні норми річного кліматичного стоку за картою ізоліній  $\bar{Y}_K$  визначалася середня зважена норма кліматичного річного стоку із використанням частинних площ водозбору, які містяться між ізолініями. Порівняння норм річного кліматичного стоку із фактичними (спостереженими) даними для водозборів річок України із стійким підземним живленням показало задовільну узгодженість цих величин. Установлено, що норма річного кліматичного стоку є тотожною нормі зонального природного річного стоку. Точність визначення норми річного кліматичного (зонального) стоку за картою ізоліній, побудованою на основі метеорологічних даних, становить  $\pm 10\%$ .

Для річок з нестійким підземним живленням є характерною суттєва відмінність кліматичного (зонального) річного стоку від природного. Для таких випадків модель «клімат-стік» передбачає використання коефіцієнтів переходу від норм річного кліматичного стоку, визначених за картами ізоліній  $\bar{Y}_K$ , до природного (непорушеного господарською діяльністю). Ці коефіцієнти описують вплив чинників підстильної поверхні на процес формування річного стоку.

З метою визначення характеристик річного стоку за обраним теоретичним законом розподілу ймовірностей необхідні дані про мінливість та асиметрію річного стоку, які характеризуються коефіцієнтами варіації та асиметрії.

На базі аналізу статистичних параметрів, розрахованих по рядах річного кліматичного стоку 30-річної тривалості (1951-1980 рр.), були установлені зв'язки між багаторічною мінливістю річного стоку (коефіцієнтом варіації  $C_V$ ) та нормою річного природного стоку  $\bar{Y}_{ПР}$ :

$$C_V = \frac{1,5}{\left(\frac{\bar{Y}_{ПР}}{10}\right)^{0,62}}, \quad (8.12)$$

де  $C_V$  – коефіцієнт варіації річного стоку.

Значення у чисельнику, яке дорівнює 1,5, є коефіцієнтом варіації, який відповідає нормі річного стоку рівній 10 мм ( $C_V=1,5$  при  $\bar{Y}_{ПР}=10$  мм) для кліматичних умов узбережжя Чорного моря до початку значущих змін клімату на території України (до 1989 року). Між коефіцієнтами асиметрії та варіації річного стоку для території Північно-Західного Причорномор'я за даними минулих років установлене таке співвідношення

$$C_S = 1,7C_V, \quad (8.13)$$

де  $C_S$  – коефіцієнт асиметрії.

Коефіцієнти варіації та асиметрії річного кліматичного стоку були представлені у вигляді статистично однорідних районів на картах України, які опубліковані.

Модель “клімат-стік” дозволяє виконувати розрахунки річного зонального стоку за метеорологічними даними сценаріїв змін глобального та регіонального клімату.

Рівняння водно-теплогового балансу для розрахунків природного зонального річного стоку у змінених кліматичних умовах набуває вигляду

$$\bar{Y}'_K = (\bar{X} \pm \Delta\bar{X}) - \bar{E}'_m \left[ 1 + \left( \frac{\bar{X} \pm \Delta\bar{X}}{\bar{E}'_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (8.14)$$

де  $\bar{Y}'_K$  – норма кліматичного річного стоку в змінених кліматичних умовах, розрахована за метеорологічними даними, мм;

$\bar{E}'_m$  – базова (установлена до початку значущих змін клімату) норма максимально можливого випаровування, яка визначається за даними про температуру повітря згідно із формулою (8.11), мм;

$\bar{X}$  – базова (установлена до початку значущих змін клімату) норма річних опадів, мм;

$\Delta\bar{X}$  – зміна сумарних опадів за сценаріями;

$\Delta\bar{T}$  – зміна температур повітря, яка визначає величину максимально можливого випаровування;

$n$  – параметр, який інтегрує вплив фізико-географічних умов на формування стоку і приймається рівним 3;

$\bar{E}'_m$  – норма максимально можливого випаровування у сценарних кліматичних умовах, тобто максимально можливе випаровування, яке розраховується за даними про температуру повітря для заданого кліматичного сценарію у відповідності із (8.11).

Було досліджено чутливість кліматичного стоку, розрахованого за моделлю “клімат-стік”, до змін метеорологічних характеристик. На основі числових експериментів встановлено, що зміна норм річного кліматичного стоку стає значущою при зміні річних опадів на  $\pm 3,5\%$  за рік або при зміні сум середньомісячних температур повітря за період червень-серпень на  $\pm 2,5^\circ\text{C}$ . Передбачувані зміни метеорологічних характеристик, наведені в сценаріях, перевищують зазначені межі й, отже, згідно сценаріям ВМО водні ресурси України достатньо точно описуються на базі моделі “клімат-стік”.

Схема розрахунків змін характеристик річного стоку за кліматичними сценаріями складається з таких етапів.

1. Розрахунки характеристик стоку за метеорологічними даними сценарію у вузлах сітки за моделлю «клімат-стік».
2. Побудова карти ізоліній норм річного кліматичного стоку у

сценарних умовах.

3. Визначення значень стоку у роки різної водності.

4. Порівняння отриманих характеристик із даними базового періоду.

Базовий період є періодом відносно якого розраховуються відхилення сценарних даних.

Суттєве значення при розрахунках норм річного кліматичного (зонального) стоку відіграє співвідношення ресурсів тепла та вологи, яке також розглядається як характеристика зволоженості (посушливості) клімату:

$$\beta_X = \frac{\bar{X}}{E_m}, \quad (8.15)$$

де  $\bar{X}$  – середнє багаторічне значення річних опадів, мм;

$E_m$  – середнє багаторічне значення максимально можливого випаровування, мм.

Більшість індексів посушливості базуються на порівнянні зволоження  $\bar{X}$  із втратами на випаровування, які представляються через радіацію, температури повітря і інші кліматичні змінні. У даному випадку використаний теплоенергетичний еквівалент або максимально можливе випаровування  $E_m$ .

За величиною  $\beta_X$  виділяються такі області зволоженості (посушливості):

$$\beta_X \geq 1,0 - \text{зона надмірного зволоження}, \quad (8.16)$$

$$0,8 \leq \beta_X < 1,0 - \text{зона достатнього зволоження}, \quad (8.17)$$

$$0,5 \leq \beta_X < 0,8 - \text{зона недостатнього зволоження}, \quad (8.18)$$

$$0,2 \leq \beta_X < 0,5 - \text{напіваридна зона}, \quad (8.19)$$

$$0,03 \leq \beta_X < 0,2 - \text{аридна зона}, \quad (8.20)$$

$$\beta_X < 0,03 - \text{гіпераридна зона}. \quad (8.21)$$

Значення  $\beta_X=0,5$  розглядається як межа між зоною недостатнього зволоження та напіваридною зоною (рис. 8.2). Розташування території нижче ізолінії  $\beta_X<0,5$  означає, що вона знаходиться в напіваридній зоні. Терміни “аридна та напіваридна” зони застосовуються для тих районів, де опадів недостатньо для розвитку сільського господарства. До початку значущого впливу змін клімату на термічний режим України (до 1989р.) напіваридна зона займала територію узбережжя Північно-Західного Причорномор'я та територію Степового Криму.



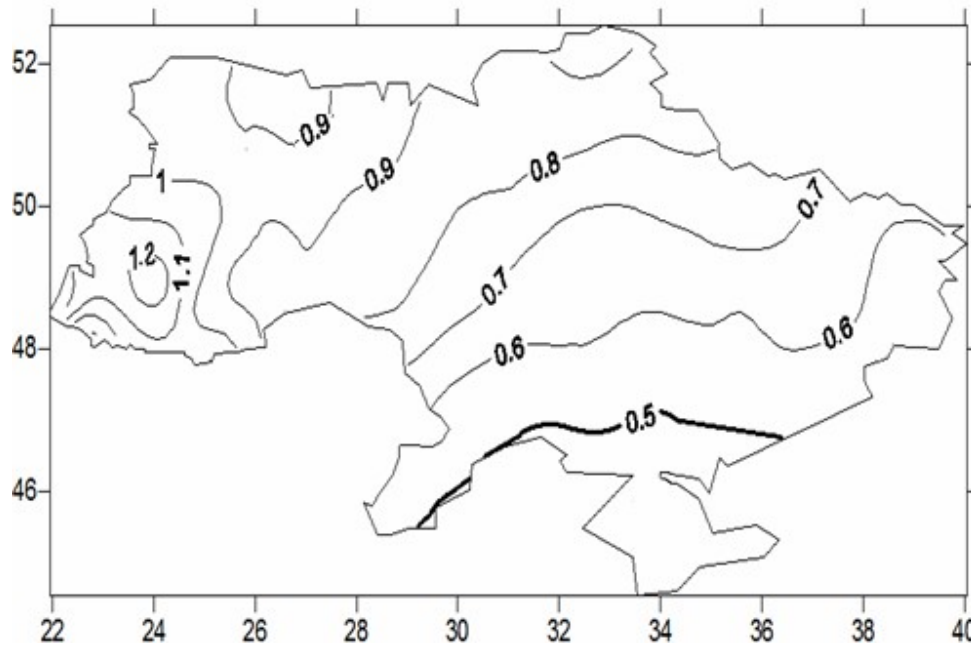


Рисунок 8.2 – Просторовий розподіл показника зволоженості  $\beta_x$ , визначеного за даними до 1989 року (до початку значущого впливу глобального потепління)

## 8.2 Теоретичні основи розрахунків характеристик річного стоку в умовах водогосподарських перетворень

Зміни стоку при дослідженні водогосподарських перетворень можна описати рівняннями водогосподарських балансів, у яких природний річний стік  $W_{ПР}$  розглядається як початковий стан гідрологічної системи, а побутовий - як результат водогосподарської діяльності

$$W_{ПОБ} = W_{ПР} - \Delta W_3 + \Delta W_{СК}, \quad (8.22)$$

де  $W_{ПОБ}$ ,  $W_{ПР}$  – об'єми побутового та природного стоку;

$\Delta W_3$  – вилучення вод з поверхневих водотоків;

$\Delta W_{СК}$  – скидання вод у поверхневі водотоки.

Стохастичне моделювання рядів побутового стоку виконувалося роздільно для кожного з досліджуваних чинників водогосподарської діяльності на основі відповідного рівняння водогосподарського балансу, яке описує взаємодію того або іншого чинника водогосподарської діяльності з річним стоком.

Рівняння водогосподарських балансів водозборів, представлені в ймовірнісному вигляді, записуються таким чином:

а) при заборах води з місцевого стоку на зрошення сільськогосподарських угідь

$$Y_{\text{ПОБ},P} = Y_{\text{ПР},P} - \frac{M_{0,100-P}}{\eta} f_{3P}; \quad (8.23)$$

б) при наявності на водозборі штучних водойм, які зумовлюють втрати на додаткове випаровування з водної поверхні

$$Y_{\text{ПОБ},P} = Y_{\text{ПР},P}(1 - f_B) - (E_B - X)_{100-P} f_B; \quad (8.24)$$

в) при надходженні до водотоків зворотних вод з сільськогосподарських земель, які зрошуються за рахунок річок-донорів

$$Y_{\text{ПОБ},P} = Y_{\text{ПР},P} + \xi \frac{M_{0,100-P}}{\eta} (1 - \eta) f_{3P}; \quad (8.25)$$

г) при осушуванні боліт та заболочених земель

$$Y_{\text{ПОБ},P} = Y_{\text{ПР},P} + \mu \Delta H_{\text{ГР},P} f_{\text{ОС}} + (w_{\text{ПР}} - w_{\text{ОС}}) \Delta H_{\text{ГР},P} f_{\text{ОС}}; \quad (8.26)$$

де  $Y_{\text{ПОБ},P}, Y_{\text{ПР},P}$  - побутовий та природний річний стік із заданою забезпеченістю  $P$ , виражений в мм;

$f_{3P}, f_B$  - сумарні площі зрошуваних масивів та водної поверхні штучних водойм відповідно, виражені в частках від загальної площі водозбору  $F$ ;

$\eta$  - коефіцієнт корисної дії зрошувальної системи;

$\xi$  - коефіцієнт зворотних вод, які утворилися за рахунок втрат стоку на інфільтрацію при зрошуванні сільськогосподарських масивів й надходять до русла річки підземним шляхом;

$X$  - опади, які випали на водну поверхню ставків та водосховищ;

$E_B$  - сумарне випаровування з водної поверхні ставків і водосховищ;

$M_{0,100-P}$  - зрошувальна норма-нетто з ймовірністю перевищення;

$\mu$  - коефіцієнт водовіддачі ґрунтів, який оцінюється як різниця між повною й найменшою вологоємністю ґрунтів, поділеною на товщину даного шару ґрунтів;

$\Delta H_{\text{ГР}}$  - зміна середнього рівня ґрунтових вод в результаті осушування;

$f_{\text{ОС}}$  - показник меліорованості території або відношення сумарної площі осушуваних земель до загальної площі водозбору  $F$ ;

$w_{\text{ПР}}$  - об'ємна вологість торф'яного покладу до осушування;

$w_{\text{ОС}}$  - об'ємна вологість торф'яного покладу після осушування;

$F$  - площа водозбору, км<sup>2</sup>.

На вході у моделі побутового (перетвореного водогосподарською діяльністю) стоку завжди використовується природний стік заданої забезпеченості  $P$ .

Щоб отримати ряди природного стоку, виконують генерування штучних рядів при заданих статистичних параметрах природного річного стоку за стохастичною моделлю простого ланцюга Маркова.

При відсутності даних спостережень за стоком у природних умовах його формування використовують просторово-часові узагальнення моделі “клімат-стік”.

Наведені рівняння містять у собі випадкові складові, які описуються певними законами розподілу випадкових величин (трипараметричний гама розподіл С.М. Крицького та М.Ф. Менкеля або закон Пірсона III) і залежать від кліматичних умов. Масштаби водогосподарських перетворень (площі осушених боліт, водної поверхні штучних водойм, зрошуваних сільськогосподарських масивів та інше) є не випадковими величинами, які не підлягають ймовірнісному опису і у процесі моделювання залишаються постійними.

З метою збереження стаціонарності рядів стоку, що генеруються, на кожному кроці імітаційного моделювання показники масштабів водогосподарської діяльності вважалися постійними. В результаті кожного проведеного імітаційного експерименту були отримані статистичні параметри річного побутового стоку, які відповідають заданим масштабам водогосподарської діяльності та стану клімату. За установленими статистичними параметрами виконується перехід до стоку заданої забезпеченості за обраним законом розподілу випадкової величини.

Результати стохастичного моделювання узагальнюються у вигляді графічних рішень або аналітичних функцій, які являють собою “функції відгуку” характеристик річного стоку на водогосподарські перетворення і називаються “функціями антропогенного впливу”. Оскільки в межах водозбору однієї й тієї ж річки кількісний та якісний склад чинників може змінюватися, з метою врахування сумісного впливу водогосподарських чинників запропоновано використовувати термін “коефіцієнти антропогенного впливу”

$$K_A = \frac{A_f}{A_0}, \quad (8.27)$$

де  $A_0$  - значення того або іншого статистичного параметра річного стоку в природних умовах;

$A_f$  - значення параметра побутового стоку при заданих показниках антропогенного впливу.

Коефіцієнти антропогенного впливу установлюються для кожного виду діяльності окремо.

Сумісний вплив  $m$  водогосподарських чинників на параметр  $A_0$  ураховується таким рівнянням

$$A_f = A_0[K_1 + K_2 + K_3 \dots + K_m - (m - 1)], \quad (8.28)$$

де  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_m$  - коефіцієнти, які кількісно враховують зміни статистичних параметрів річного стоку;

$m$  - кількість розглянутих видів водогосподарської діяльності.

За наявності трьох чинників водогосподарської діяльності сумісний облік впливу чинників господарської діяльності виконується за таким рівнянням

$$A_f = A_0(K_1 + K_2 + K_3 - 2); \quad (8.29)$$

за наявності двох чинників господарської діяльності

$$A_f = A_0(k_1 + k_2 - 1). \quad (8.30)$$

Для практичного застосування були виконані узагальнення результатів імітаційних випробувань на основі моделі множинної регресії.

Загальний вигляд рівнянь множинної лінійної регресії для визначення коефіцієнтів антропогенного впливу при вилученні води на зрошення за рахунок місцевого стоку для досліджуваної території такий:

$$K_{\bar{Y}} = 1,00 - a_{\bar{Y}} \lg(f_{3p} + 1) - b_{\bar{Y}} v_0 + m_{\bar{Y}} \eta; \quad (8.31)$$

$$K_{C_v} = 1,00 + a_{C_v} \lg(f_{3p} + 1) + b_{C_v} v_0 - m_{C_v} \eta; \quad (8.32)$$

$$K_{C_s} = 1,00 + a_{C_s} \lg(f_{3p} + 1) + b_{C_s} v_0 - m_{C_s} \eta; \quad (8.33)$$

де  $k_{\bar{Y}}, k_{C_v}, k_{C_s}$  - коефіцієнти впливу зрошування за рахунок місцевих водних ресурсів на середню багаторічну величину стоку  $\bar{Y}$  та на коефіцієнти варіації  $C_v$  й асиметрії  $C_s$  відповідно;

$a_A, b_A, m_A$  - коефіцієнти рівнянь множинної регресії для різних статистичних параметрів стоку  $A$ ;

$\eta$  - коефіцієнт корисної дії зрошувальної системи;

$v_0$  - безрозмірна характеристика середнього за весь вегетаційний період рівня зволоження ґрунту, при якому розвиток відповідної сільськогосподарської культури є оптимальним.

Коефіцієнти антропогенного впливу при зрошуванні сільськогосподарських масивів за рахунок стоку річок-донорів можна розрахувати за такими регресійними рівняннями:

$$K_{\bar{Y}}'' = 1,00 + n_{\bar{Y}} f_{3p} + l_{\bar{Y}} v_0 + d_{\bar{Y}} \xi + C_{\bar{Y}} \eta; \quad (8.34)$$

$$K_{C_v}'' = 1,00 - n_{C_v} f_{3p} - l_{C_v} v_0 - d_{C_v} \xi + C_{C_v} \eta; \quad (8.35)$$

$$K_{C_s}'' = 1,00 + n_{C_s} f_{3p} + l_{C_s} v_0 + d_{C_s} \xi - C_{C_s} \eta, \quad (8.36)$$

де  $k_A''$  – коефіцієнти впливу зрошування за рахунок річки-донора на досліджуваний статистичний параметр  $A$ ;

$n_A, l_A, d_A$  - коефіцієнти рівнянь множинної регресії.

Оцінка коефіцієнтів антропогенного впливу за рахунок втрат на додаткове випаровування з водної поверхні при наявності штучних водойм на водозборі при сумарній площі водного дзеркала  $f_B$  (%), виконують за загальним рівнянням вигляду

$$K'_{A_{АНТР}} = e^{[\psi(\alpha'_A, Y_{ПП}, f_B)]}, \quad (8.37)$$

яке для певних статистичних параметрів річного стоку можна записати у вигляді:

$$K'_{\bar{Y}} = e^{-\alpha'_{\bar{Y}} f_B}, \quad (8.38)$$

$$K'_{c_v} = e^{\alpha'_{c_v} f_B}, \quad (8.39)$$

$$K'_{c_s} = e^{\alpha'_{c_s} f_B}, \quad (8.40)$$

де  $f_B$  – сумарна площа водної поверхні штучних водойм при НПУ (нормальний підпертий рівень води), виражена в частках від загальної площі водозборів.

В свою чергу, коефіцієнти  $\alpha'_A$  розраховуються для різних географічних зон в залежності від  $\bar{Y}_K$ .

Методика розрахунків природного та побутового річного стоку увійшла складовою у нормативні документи республіки Молдова по розрахунках річного стоку річок із недостатністю даних спостережень, або значною його трансформацією водогосподарською діяльністю.

### Контрольні запитання

- 1 Яке рівняння слугує теоретичною основою розрахунків природного річного стоку за моделлю «клімат-стік»?
- 2 Яке рівняння слугує теоретичною основою розрахунків побутового річного стоку за моделлю «клімат-стік»?
- 3 Який стік отримав назву?
- 4 Як відбувається перехід від зонального кліматичного стоку до стоку малих та середніх водозборів?
- 5 Як визначається коефіцієнт варіації для кліматичного річного стоку?

## 9 БЛОК РОЗРАХУНКІВ ПРИРОДНОГО РІЧНОГО СТОКУ ЗА МОДЕЛЛЮ “КЛІМАТ-СТІК”

Сучасний стік річок України зазнає значного антропогенного впливу, прикладами якого є будівництво ставків та водосховищ, перекидання стоку великих річок по каналах з метою забезпечення водою населення посушливого півдня, зрошування сільськогосподарських земель водами місцевих водотоків та водами річок-донорів, осушування перезволожених земель та інше. У наш час до водогосподарських перетворень додалася така складова як глобальне потепління, яке відбувається у результаті зростання вмісту парникових газів у атмосфері.

Україна, ратифікувавши Рамкову Конвенцію ООН з питань змін клімату (1996 р.), взяла на себе зобов'язання не тільки обмежити викиди парникових газів, а й досліджувати зміни регіонального клімату та їх вплив на природні ресурси України, включаючи водні. Захист водних ресурсів в умовах змін глобального клімату розглядається як важливе завдання на міжнародному й національному рівнях. Діяльність Уряду України спрямована на підтримання екологічної рівноваги, раціональне використання та відновлення природних водних ресурсів.

Даних про стік річок у природних (непорушених водогосподарською діяльністю) умовах його формування на території України практично немає. Більшість гідрологічних постів була відкрита після Другої Світової війни, у 50-ті роки минулого сторіччя. Це й же період характеризується інтенсифікацією сільськогосподарського виробництва, яке супроводжувалося будівництвом штучних водойм, регулюванням стоку річок, розвитком меліорацій. Таким чином, матеріали спостережень за стоком надають відомості не про природний, а про побутовий (перетворений водогосподарською діяльністю) стік. Південна частина України характеризується нестачею даних спостережень за стоком як у природних, так і порушених водогосподарською діяльністю умовах. Через нестачу вихідних даних ізолінії норм річного стоку на картах нормативних документів проведені для території Північно-Західного Причорномор'я пунктиром (СНіП 2.01.14-83).

Для визначення характеристик стоку у природних умовах доцільно використовувати метеорологічні дані, оскільки вони не підпадають під вплив водогосподарської діяльності та мають більшу тривалість у часі при порівнянні з гідрологічними даними й визначаються на базі більш розвиненої мережі спостережень. Основою розрахунків стоку за метеорологічними даними є балансові методи.

Стік, розрахований за метеорологічними даними, виключає вплив чинників підстильної поверхні як природного походження, так і зумовлених водогосподарськими перетвореннями. Таким чином, отримані характеристики стоку можуть розглядатися як такі, що описують

природний зональний стік. Моделі розрахунків стоку, на вході яких використовуються метеорологічні дані, отримали назву моделей “клімат-стік”.

У наш час Всесвітньою Метеорологічною Організацією (ВМО) розробляються довгострокові прогнози змін клімату на Землі. Методи розрахунків характеристик стоку за метеорологічними даними, побудованими на основі моделей типу “клімат – стік”, надають можливість передбачати стан водних ресурсів у нових кліматичних умовах, описаних кліматичними сценаріями майбутнього.

Досить перспективним для створення таких моделей визнано балансовий підхід, який базується на сумісному розгляді рівнянь водного та теплового балансів підстильної поверхні. Метод водно-теплового балансу у модифікації В.С. Мезенцева був адаптований для умов України на кафедрі гідрології суші Одеського державного екологічного університету під керівництвом професорів Є.Д. Гопченка та Н.С.Лободи (N.S. Loboda, 1998; Є.Д. Гопченко, Н.С. Лобода, 2001).

### 9.1 Метод водно-теплового балансу

Моделі типу “клімат – стік” спираються на використання у розрахунках стоку метеорологічних характеристик. Найпростішою з таких моделей є рівняння водного балансу за багаторічний період

$$\bar{X} = \bar{E} + \bar{Y} , \quad (9.1)$$

де  $\bar{X}$ ,  $\bar{E}$ ,  $\bar{Y}$  - середні багаторічні річні опадів, випаровування з поверхні суші та стоку відповідно.

У випадку оцінки середньої багаторічної величини річного стоку на основі рівняння водного балансу виду

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E} \quad (9.2)$$

проблема полягає у незадовільній точності визначення норми випаровування з поверхні суші. Структура водного балансу ділянки суші тісно зв'язана з її тепловим балансом, тобто з надходженням і перетворенням поверхнею та діяльним шаром ґрунту тепла сонячної радіації. Ця обставина зумовила потребу розглядати задачу визначення елементів водного балансу разом з теплоенергетичним балансом земної поверхні. Процес теплообміну в будь-якій точці простору і за будь-який проміжок часу може бути представлений у вигляді надходження й витрати енергії на поверхні землі

$$R^+ + P^+ + (B_1 - B_2) = LE + P^- + I_H - LC, \quad (9.3)$$

де  $R^+$  - приходна частина радіаційного балансу;

$P^+$  - приходна складова турбулентного теплообміну або тепло, яке надходить на ділянку суші в зв'язку з рухом повітря, тобто адвективне тепло;

$B_1 - B_2$  - зміна запасів тепла в діяльному шарі ґрунту (теплообмін у ґрунті, позначається як  $\Delta B$ );

$L$  - "приховане" тепло пароутворення;

$LE$  - витрата тепла на випаровування;

$P^-$  - витрата тепла на нагрівання повітря (від'ємна частина турбулентного теплообміну);

$I_H$  - довгохвильове випромінювання земної поверхні у нічні часи доби;

$LC$  - витрата тепла на конденсацію.

Приходна складова  $R^+$  радіаційного балансу земної поверхні визначається як різниця між короткохвильовою радіацією  $R_K$ , що надходить до земної поверхні в денну частину доби, та довгохвильовим випромінюванням від земної поверхні  $I_D$

$$R^+ = R_K - I_D, \quad (9.4)$$

де  $I_D$  - баланс довгохвильового випромінювання (випромінювання земної поверхні за мінусом противипромінювання атмосфери) у денні та частково сутінкові години доби.

Ліва (приходна) частина рівності (9.3) розглядається як граничні ресурси енергії, які забезпечують процес випаровування у визначених кліматичних умовах й називаються "теплоенергетичними ресурсами клімату"

$$LE_m = R^+ + P^+ + (B_1 - B_2), \quad (9.5)$$

де  $E_m$  - так званий "теплоенергетичний еквівалент", тобто шар води, який міг би випаритися з поверхні суші, якби на процес випаровування були витрачені усі теплоенергетичні ресурси клімату

$$E_m = \frac{R^+ + P^+ + (B_1 - B_2)}{L}. \quad (9.6)$$



Таким чином, теплоенергетичний еквівалент  $E_m$  - це величина, яка за своїм фізичним змістом близька до величини  $E_0$  - випаровуваності або максимально можливого випаровування. Тому  $E_m$  часто називають максимально можливим випаровуванням.

Величина  $E_0$  (випаровуваність) визначалася багатьма авторами як верхня межа випаровування, але інтерпретувалася по-різному: «випар зі зволоженої поверхні» (М.І. Будико); «випар з водної поверхні при тому ж комплексі метеорологічних умов, що й над сушею» (Н.А. Багров); «випар з поверхні полів, вкритих рослинністю, коли вологість ґрунту близька до найменшої польової вологоємності» (А.Р. Константинов). На відміну від інших авторів, В.С. Мезенцеву вдалося надати однозначний фізичний зміст поняттю “випаровуваність”.

Права або витратна частина рівняння теплового балансу позначається як “сумарний теплообмін”  $T$ , зумовлений нагріванням приземного повітря за рахунок турбулентного обміну й нічного ефективного випромінювання земної поверхні (без противипромінювання атмосфери). Тоді (9.3) можна представити у вигляді

$$LE_m = LE + T . \quad (9.7)$$

Теоретичними границями зміни складових рівняння (9.7) є такі величини:

$$LE_m \geq LE \geq 0; \quad (9.8)$$

$$LE_m \geq T \geq 0. \quad (9.9)$$

Іншими словами, витрати тепла на фактичне випаровування та сумарний теплообмін завжди менші від теплоенергетичних ресурсів клімату, тому що в природі завжди спостерігається витрата тепла.

Рівняння водного та теплового балансів містять у собі загальну складову – випаровування з поверхні суші. Для визначення стоку необхідно, насамперед, розрахувати випаровування, представивши його через складові теплового балансу. Загальне рівняння водного балансу для ділянки суші представляється таким чином

$$H = E + Y , \quad (9.10)$$

де  $H$  - характеристика зволоження території.

Під характеристикою зволоження  $H$  розуміють опади  $X$ , які випадають за розрахунковий період, зміни  $(w_1 - w_2)$  запасів вологи в

грунті й у водоносних горизонтах ( $Y_{ГР1} - Y_{ГР2}$ )

$$H = X + (w_1 - w_2) + (Y_{ГР1} - Y_{ГР2}) . \quad (9.11)$$

Для “замкненого” водозбору зволоження визначається рівнянням (О.В. Гушля, В.С. Мезенцев, 1982)

$$H = X + w_1 - w_2 . \quad (9.12)$$

Введення характеристики теплоенергетичних ресурсів у рівняння водного балансу (9.10) досягається діленням лівої і правої частин цього рівняння на величину  $E_m$

$$\frac{H}{E_m} = \frac{E}{E_m} + \frac{Y}{E_m} . \quad (9.13)$$

Складові рівняння (9.13)  $H, E, Y$  позначаються як  $\beta_H, \beta_E, \beta_Y$  відповідно. Отже (9.13) можна записати у вигляді

$$\beta_H = \beta_E + \beta_Y , \quad (9.14)$$

де

$$\beta_H = \frac{H}{E_m} ; \quad \beta_E = \frac{E}{E_m} ; \quad \beta_Y = \frac{Y}{E_m} . \quad (9.15)$$

Граничні умови складових (9.14) є такими

$$0 \leq \beta_E \leq 1 \text{ при } 0 \leq \beta_H \leq \infty \text{ та } 0 \leq \beta_Y \leq \beta_H \leq \infty . \quad (9.16)$$

Після диференціювання рівняння (9.14) за величиною співвідношення ресурсів вологи і тепла  $\beta_H$  В.С. Мезенцев одержав рівняння такого вигляду

$$\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} + \frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = 1 . \quad (9.17)$$

Після наближеного розв’язання (9.17) частинне рівняння зв’язку між складовими водного та теплового балансів представлено у такий спосіб

$$\beta_E = (1 + \beta_H^{-n})^{-\frac{1}{n}} , \quad (9.18)$$

де  $n$  - параметр, що інтегрує вплив фізико-географічних умов формування стоку.

З урахуванням позначень (9.15)

$$E = E_m \left[ 1 + \left( \frac{H}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} . \quad (9.19)$$

Відповідно рівняння водного балансу (9.10) набуде вигляду

$$H = Y + E_m \left[ 1 + \left( \frac{H}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} . \quad (9.20)$$

Рівняння (9.20) містить складову, яка входить у тепловий баланс земної поверхні і являє собою випаровування з поверхні суші  $E$ , представлене через (9.19), у зв'язку з чим вираз (9.20) називають рівнянням водно-теплого балансу.

Балансове співвідношення (9.20), виражене відносно величини стоку  $Y$ , має вигляд

$$Y = H - E_m \left[ 1 + \left( \frac{H}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} . \quad (9.21)$$

Коли розглядається водний баланс замкненого водозбору, під величиною  $Y$  слід розуміти сумарний стік, який вміщує підземну та поверхневу складові стоку (Є.Д. Гопченко, О.В. Гушля, 1988).

При розбіжності розмірів та меж поверхневого й підземного водозборів може виникнути додатковий приплив (в області розвантаження підземних вод) або відтік (в області живлення підземних) вод, який необхідно врахувати у рівнянні водного балансу (9.11) окремою складовою  $Y_{Г1} - Y_{Г2} = \Delta Y_{ГР}$ .

Для розрахунків стоку у межах року (по сезонах, місяцях, декадах) використовують рівняння вигляду

$$Y = X + w_1 - w_2 - E_m \left[ 1 + \left( \frac{X + w_1 - w_2}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} . \quad (9.22)$$

Різниця  $(w_1 - w_2)$ , яка представляє собою зміну вологовмісту

розрахункового шару ґрунту, набирає істотних додатних та від'ємних значень у середині року (місяці, декади) і в окремі роки (групи років).

Для багаторічного періоду зміна запасів вологи у ґрунті наближається до нуля, отже, виконується умова  $(w_1 - w_2) = 0$  або  $\pm \Delta w = 0$ , у зв'язку з чим балансове співвідношення (9.22) набуває вигляду

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E}_m \left[ 1 + \left( \frac{\bar{X}}{\bar{E}_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (9.23)$$

де  $\bar{Y}$ ,  $\bar{X}$ ,  $\bar{E}_m$  - середні багаторічні величини (норми) річного стоку, опадів та теплоенергетичного еквівалента (максимально можливого випаровування), відповідно.

Результати досліджень показали, що для річного стоку має сенс використовувати  $n = 3$ .

Середня багаторічна величина річного стоку, розрахована за (9.23), визначається кліматичними чинниками формування річного стоку (річними опадами й максимально можливим випаровуванням), у зв'язку з чим одержала назву кліматичного стоку. **Норма річного кліматичного стоку  $\bar{Y}_K$  є середньою багаторічною характеристикою річного стоку, який утворився в результаті певного співвідношення характеристик тепла та вологи  $\beta_H$ , підлягає закону географічної зональності й відповідає зональному природному річному стоку.**

Карти ізолій норм річного кліматичного стоку будуються за даними метеорологічних станцій і відносяться у просторі не до геометричного центра водозборів, а до точок, які відповідають географічним координатам відповідних станцій. Матеріалами необхідними для визначення кліматичної норми річного стоку є складові радіаційного та теплового балансів підстильної поверхні за багаторічний період, а також середні багаторічні дані по опадах та температурах за календарні місяці й роки.

## 9.2 Теплоенергетичні ресурси клімату

Величина  $LE_m$ , представлена рівнянням (9.5), визначає граничні, тобто максимально можливі енергетичні ресурси клімату, а значення шару максимально можливого випаровування  $E_m$  в (9.6) розглядається як теплоенергетичний еквівалент, який дозволяє використовувати характеристики теплоенергетичних ресурсів клімату у рівнянні водно-теплового балансу. Найбільші труднощі при використанні (9.6) створює

визначення величини  $(B_1 - B_2)$ , яка характеризує зміни запасів тепла в діяльному шарі ґрунту. Однак у цілому за рік, і тим більше за багаторічний період, виконується умова  $(B_1 - B_2) = 0$ . Отже

$$\bar{E}_m = \frac{\bar{R}^+ + \bar{P}^+}{L}, \quad (9.24)$$

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

$\bar{R}^+, \bar{P}^+$  - норми приходних складових рівняння теплового балансу підстильної поверхні.

Дані про річні складові радіаційного балансу містяться у матеріалах спостережень актинометричних станцій. Приходна складова радіаційного балансу визначається як різниця між короткохвильовою частиною радіаційного балансу підстильної поверхні та її довгохвильовим випромінюванням. Що стосується приходної (спрямованої до земної поверхні) складової турбулентного теплообміну  $P^+$ , то її величина складає лише близько 20% від річної суми розрахункового турбулентного теплообміну в денний час, коли потік тепла спрямований вгору від поверхні і не перевищує 10-15% від річного радіаційного балансу. Запропонована емпірична формула для розрахунку річної величини  $P^+$

$$P^+ = 285 - 0,820R, \quad (9.25)$$

де  $R$  - величина річного радіаційного балансу, Мдж/м<sup>2</sup>.

Таким чином, при  $R = 0$  річна величина  $P^+$  складає 285 Мдж/м<sup>2</sup>, а при  $R < 0$ , приходна складова турбулентного теплообміну буде зростати. У межах України приходна складова турбулентного теплообміну змінюється від 124 до 167 Мдж/м<sup>2</sup> у рік.

Число актинометричних станцій (менше 20 у межах України за даними минулого сторіччя) обмежене і є недостатнім для детального опису просторового розподілу теплоенергетичних ресурсів клімату. Оскільки температурний режим України значною мірою зумовлений надходженням сонячної радіації до земної поверхні, для розрахунків  $\bar{E}_m$  за даними метеорологічних станцій України професори ОДЕКУ Є.Д. Гопченко та Н.С. Лобода вивели регіональну залежність величини  $\bar{E}_m$  від температурних характеристик літнього періоду, коли переважає антициклоніальна погода з малою хмарністю і слабкими вітрами

$$\overline{E_m} = 13,3 \sum_V^{IX} \overline{T_M} - 307, \quad (9.26)$$

де  $\sum_V^{IX} \overline{T_M}$  - сума норм середніх місячних температур повітря за літній період (з травня по вересень, включно). Коефіцієнт одержаного рівняння лінійної парної регресії дорівнює  $0,94 \pm 0,01$ .

Просторова зміна максимально можливого випаровування на рівнинній частині України підлягає закону широтної географічної зональності (Н.С. Лобода, 2005). Найменший градієнт величини  $\overline{E_m}$  спостерігається на північному заході Поліської низовини (рис. 9.1). Теплоенергетичні ресурси клімату зростають від 750 мм на північному заході до 1000 мм на - півдні та південному сході.

Характер розподілу ізоліній норм річних опадів відповідає картам, наведеним у довіднику «Клімат України» (1967).

### 9.3 Ресурси зволоження

Еквівалентом ресурсів зволоження території є норма річних опадів. Для характеристики розподілу норм річних опадів використовуються дані по метеорологічних станціях і постах. У «Справочниках по клімату СРСР» були наведені осереднені суми річних опадів, приведені до багаторічного періоду, за матеріалами спостережень до 1965 року.

До величин середніх місячних опадів, наведених у цьому літературному джерелі, крім поправки на змочування опадоміра та вітрове видування була додатково введена поправка, яка враховує втрати вологи на випаровування з опадоміра. Введення поправки здійснювалося за таким виразом

$$\overline{X} = \overline{X'} + k_E \overline{X}_C, \quad (9.27)$$

де  $\overline{X}$  - місячна норма опадів з урахуванням усіх систематичних похибок у показаннях опадоміра, мм;

$\overline{X}'$  - місячна норма опадів з урахуванням поправки на змочування опадоміра та вітрове видування, мм;

$\overline{X}_C$  - місячна норма опадів, розрахована за даними спостережень;

$k_E$  - поправковий коефіцієнт, який показує втрати місячних опадів на випаровування з опадоміра.

Найбільші норми річних сум опадів спостерігаються у Карпатах (більше 1000 мм). У минулому сторіччі на півночі рівнинної частини України їх величина досягала 700 мм, зменшуючись у південному напрямі до 450 мм (рис. 9.2)

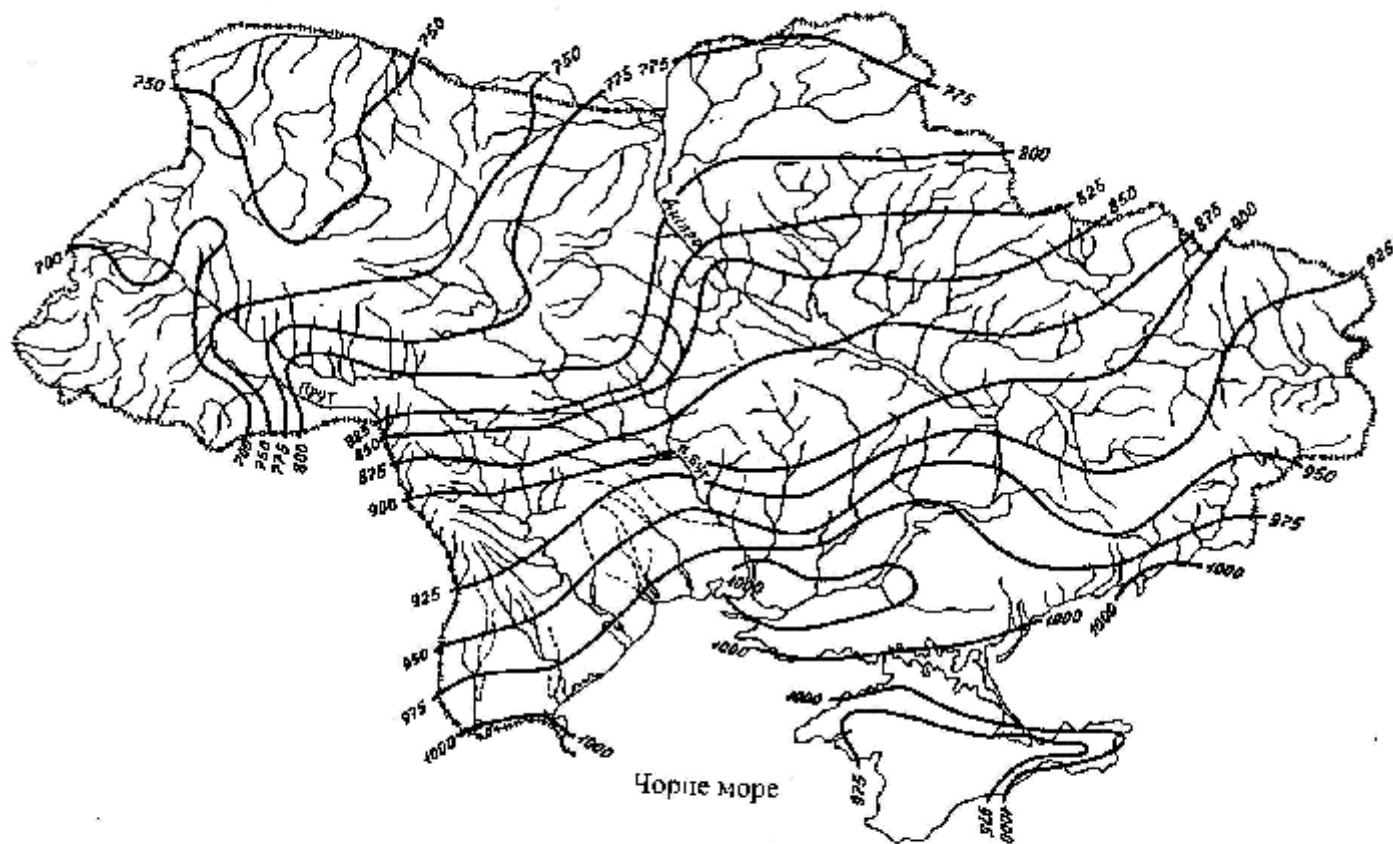


Рисунок 9.1 - Норма максимально можливого випаровування (мм) за даними до 1989 року

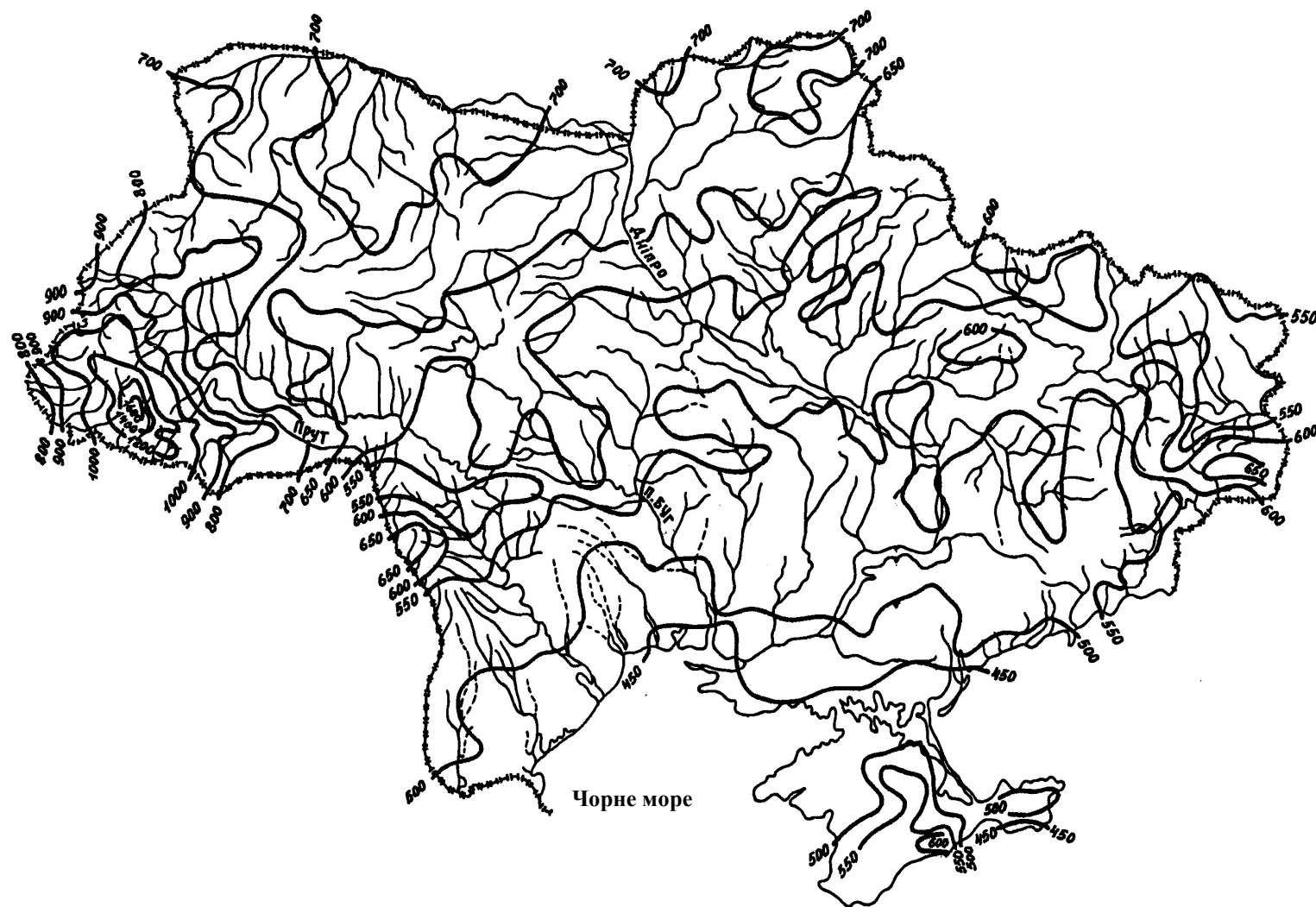


Рисунок 9.2 – Норма річних опадів (мм) за даними до 1989 року



## 9.4 Кліматичний стік

Визначення норм кліматичного річного стоку відбувалося за рівняннями (9.23) для кожної із розглянутих метеорологічних станцій. Побудова карт ізоліній виконувалась на топографічній основі 1: 500000 за середніми багаторічними даними більш ніж 900 метеорологічних станцій і постів України та Молдови (Н.С. Лобода, 2005).

Особливістю побудови карти є той факт, що розраховані норми кліматичного стоку відносяться не до центру тяжіння водозбору, як це відбувається із гідрологічними даними, а до точок простору із координатами, які відповідають географічному положенню кожної метеорологічної станції.

Апробація моделі "клімат – стік", як способу визначення характеристик природного (непорушеного водогосподарською діяльністю) річного стоку, була виконана на даних водозборів різних природних зон України, а також на даних великих річок (Є.Д. Гопченко, Н.С. Лобода, 2005; Н.С. Лобода, Ю.С. Тучковенко, 2010). Установлено, що точність визначення статистичних параметрів річного стоку за описаною моделлю знаходиться у межах точності розрахунків цих параметрів за даними гідрометричних спостережень.

За А.М. Бефані, професором і завідувачем кафедри гідрології суші ОДЕКУ у 1946-1987 рр., до великих водозборів віднесено водозбори з площею, більшою за другу критичну. Друга критична площа є площею, при якій підземне живлення річки стабілізується. Порівняльний аналіз норм природного стоку, визначених за даними гідрологічних спостережень, та норм кліматичного стоку показав, що у зоні достатнього зволоження для великих водозборів відносно відхилення цих величин знаходиться у межах  $\pm 5\%$ , а у зоні недостатнього зволоження – у межах  $\pm 10\%$ . Побудова карти норм кліматичного стоку є особливо важливою для регіонів південної України, де річок зі стоком у природних умовах його формування практично не збереглося, а початок стаціонарних спостережень збігається з інтенсифікацією водогосподарських перетворень. Просторовий розподіл норм річного кліматичного стоку (рис.9.3) зумовлений передусім розподілом норм річних опадів.

На правобережній Україні переважає вплив західного переносу повітряних мас. Тут спостерігається зменшення стоку в напрямку з північного заходу на південний схід, у той час як просторовий розподіл стоку центральних і східних областей України визначається меридіональним характером атмосферних процесів, і зменшення стоку відбувається в напрямку північ - південь. Широтна зональність розподілу норм кліматичного річного стоку порушується на сході впливом Донецького Кряжу.

Побудова карти ізоліній норм кліматичного стоку є особливо

важливою для південної України, де практично відсутні річки з природним (непорушеним водогосподарської діяльністю) стоком, а початок стаціонарних спостережень збігається з інтенсифікацією водогосподарських перетворень. До теперішнього часу у практиці гідрологічних розрахунків використовується карта ізолій норм річного стоку, рекомендована нормативним документом СНіП 2.01.14 - 83, де ізолії на території Причорномор'я і степового Криму проведені пунктиром.

### 9.5 Оцінка впливу на норму річного стоку підстильної поверхні

Норма річного кліматичного стоку, визначена за картою ізолій (див. рис.9.3), відображає зональний характер розподілу стоку, зумовлений кліматичними чинниками. Для малих та середніх річок, на водозборах яких формування стоку залежить від властивостей підстильної поверхні, установлені за картою значення  $\bar{Y}_K$  можуть відрізнятися від природного стоку.

Співставлення норм річного кліматичного та природного (непорушеного водогосподарською діяльністю) стоку різних водозборів було виконано Лободою Н.С. для території Молдови, південно-західної України, включаючи водозбори Південного Бугу, середньої та нижньої течії р. Дністер, межиріччя Дунай – Дністер та Дністер – Південний Буг, а також для річок західної частини Українського Полісся та басейну р. Сіверський Донець.

Одержані результати дозволили зробити висновки, що для великих водозборів рівнинної частини України норму кліматичного стоку можна ототожнити з нормою природного стоку (Н.С. Лобода, Нгуен Ле Мін, 2003; Є.Д. Гопченко, Н.С. Лобода, І.О. Шахман, 2005; Н.С. Лобода, 2005).

Для більшості малих та середніх водозборів, особливо у зоні недостатнього зволоження, норма кліматичного річного стоку суттєво відрізняється від природного. Відхилення тут можуть досягати 30 % і більше. З метою врахування впливу чинників підстильної поверхні були встановлені перехідні коефіцієнти до норм кліматичного стоку  $\bar{Y}_K$ , визначених за картою ізолій

$$K_{\text{ПЕР}} = \frac{\bar{Y}_{\text{ПР}}}{\bar{Y}_K}, \quad (9.28)$$

де  $K_{\text{ПЕР}}$ - перехідний коефіцієнт від норми кліматичного стоку, знятої з карти, до норми природного стоку;

$\bar{Y}_K$  - норма кліматичного стоку з водозбору, яка визначається за картою ізолій (див.рис. 9.3);

$\bar{Y}_{\text{ПР}}$  - норма природного річного стоку.

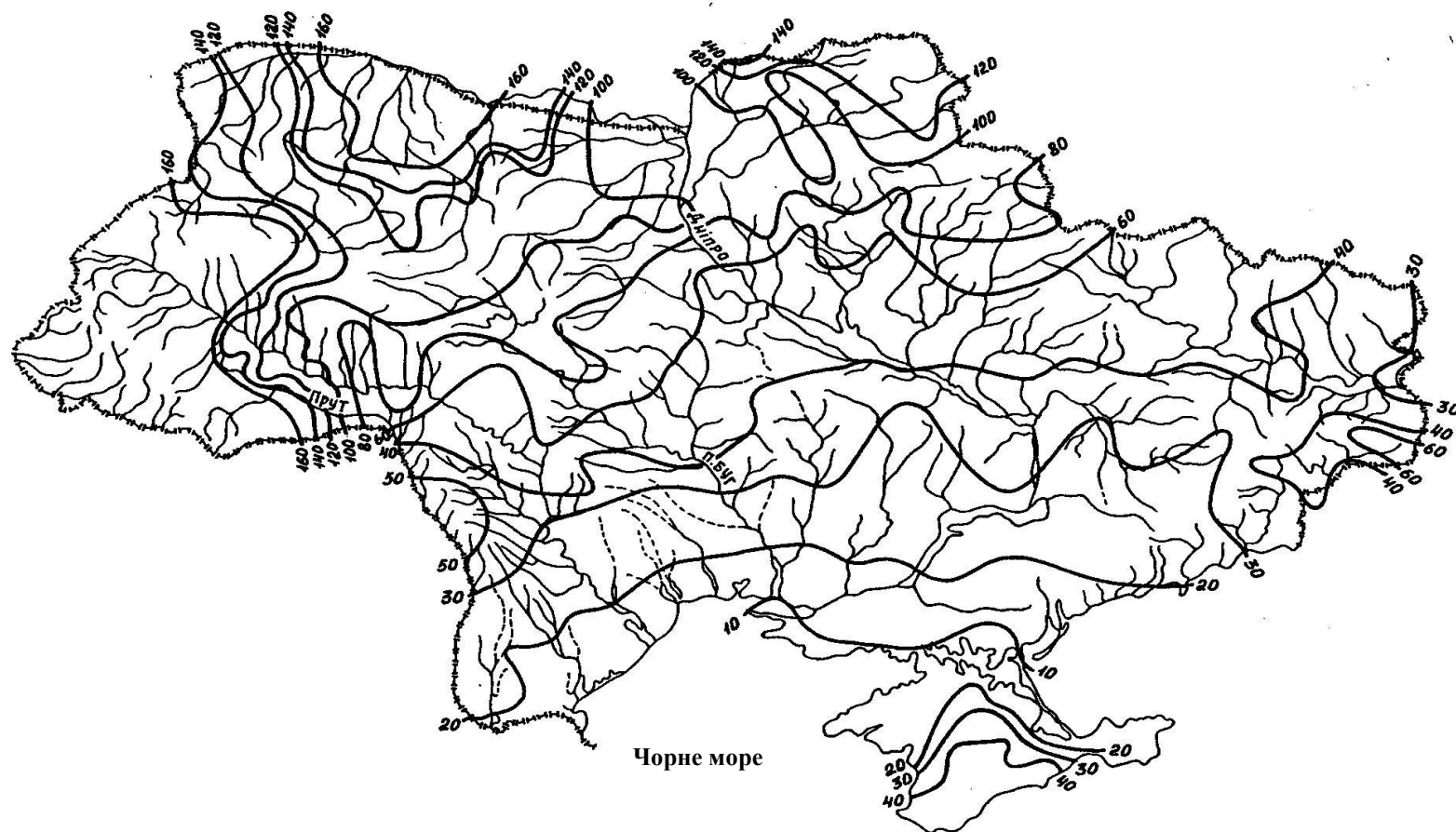


Рисунок 9.3 – Норма річного кліматичного стоку (мм) за даними до 1989 року

На базі визначених за (9.28) перехідних коефіцієнтів та кількісних показників чинників підстильної поверхні (лісистість, заболоченість, площа водозбору та інше) розроблялися розрахункові регресійні рівняння. Отримані залежності дають змогу розділити територію України на області як додатних, так і від'ємних виправлень до норми кліматичного стоку. В області додатних виправлень  $(\bar{Y}_{PP} - \bar{Y}_K) > 0$  поправочні коефіцієнти більші за одиницю ( $K_{ПЕР} > 1$ ), тобто кліматичний (зональний) стік нижчий від природного стоку малих та середніх за розмірами річок. В області від'ємних виправлень до норми кліматичного стоку  $(\bar{Y}_{PP} - \bar{Y}_K) < 0$  поправочні коефіцієнти менші за одиницю -  $K_{ПЕР} < 1$ . В області нульових виправлень норма кліматичного стоку дорівнює нормі природного стоку, а поправочний коефіцієнт набуває значення рівного одиниці.

Інтегральним показником впливу чинників підстильної поверхні на формування стоку може служити площа водозбору  $F$ . Чим менша площа, тим більшою мірою проявляється дія підстильної поверхні.

Площа водозбору може виступати як показник неповного дренажування річками водоносних горизонтів підземних вод. Область від'ємних виправлень ( $K_{ПЕР} < 1$ ) у вигляді  $K_{ПЕР} = f(F)$  поширюється на всю лісову зону рівнинної України. Так, для правобережного Полісся (притоки р.Прип'ять) перехідні коефіцієнти до норм кліматичного стоку розраховуються за таким рівнянням

$$k = 1 - 0,270[3,2 - \lg(F + 1)] \quad \text{при } F < 1700 \text{ км}^2; \quad (9.29)$$

$$k = 1 \quad \text{при } F \geq 1700 \text{ км}^2, \quad (9.30)$$

де  $k$  - коефіцієнт переходу від кліматичного стоку до природного;

$F$  - площа водозбору.

У межах лісостепової та степової зон картина складніша.

Сніговий покрив, запас води у якому визначає об'єм стоку за весняну повінь і головну частину стоку за рік у цілому, розподіляється за площею водозбору нерівномірно. Під впливом вітру відбувається перерозподіл снігового покриву в річковій мережі з подальшою акумуляцією його в ярах та балках, що призводить до зменшення норм стоку із збільшенням площі водозбору. Фактично, діюча площа водозбору, на якій формується основний об'єм стоку повені у замикальному створі, є значно меншою у порівнянні із загальною площею водозбору. Як наслідок, річні норми природного стоку малих та середніх водозборів перевищують кліматичний стік. Так, для лісостепової зони та зони північного степу коефіцієнти переходу описуються рівнянням вигляду

$$K_{ПЕР} = 2,4 - 0,7[\lg(F + 1) - 1] \quad \text{при } F < 1000 \text{ км}^2; \quad (9.31)$$

$$K_{ПЕР} = 1 \text{ при } F \geq 1000 \text{ км}^2. \quad (9.32)$$

У підзоні південного степу, де стійкий сніговий покрив утворюється дуже рідко і тому річковий стік формується переважно поєднанням талих вод у період відлиг з дощовими опадами, серед чинників підстильної поверхні значне місце займають втрати на затримання поверхневих вод у зниженнях рельєфу. Непрямим показником втрат стоку на поверхневе затримання може бути ухил водозбору. Оскільки в довідковій літературі дані про середньозважені ухили є не по усіх водозборах, для практичного застосування отримано залежність коефіцієнта  $K_{ПЕР}$  від середньої висоти водозбору, значення якої певним чином пов'язані з ухилом. Перехідні коефіцієнти зменшуються від 1 до нуля в міру зниження висоти місцевості, але лише в межах висот менших за 280 м:

$$k = 1 - 0,003(280 - H_{сер}) \text{ при } H_{сер} < 280 \text{ м}; \quad (9.33)$$

$$k = 1 \text{ при } H_{сер} \geq 280 \text{ м}, \quad (9.34)$$

де  $H_{сер}$  - середня висота водозбору.

Межа розділу між областями додатних і від'ємних виправлень до норм річного кліматичного стоку відповідає межі зим із стійким сніговим покривом, який спостерігається менше, ніж у 50 % випадків.

Істотні розбіжності між нормами природного та кліматичного річного стоку можливі, коли вододіли підземних та поверхневих водозборів не співпадають. Здебільшого така картина виникає в областях розвантаження чи живлення карсту. Урахувати дію карсту можливо лише шляхом визначення перехідних коефіцієнтів за виразом (9.28) для певних закарстованих річок. Непрямим показником впливу гідрогеологічних умов на формування стоку закарстованих водозборів також може бути норма інфільтрації опадів у водоносні горизонти  $U_0$ , просторовий розподіл якої визначається не тільки кліматичними умовами, а й водно-фізичними властивостями ґрунтів. Зокрема, величина  $U_0$  використовувалася як предиктор при побудові регресійних рівнянь для визначення коефіцієнта  $K_{ПЕР}$  для річок Приазов'я, лівобережних приток Дністра.

## 9.6 Методика розрахунків характеристик річного стоку за моделлю “клімат-стік”

Визначення статистичних параметрів річного стоку у природних умовах на основі моделі “клімат-стік” відбувається на основі карти ізолій норм річного кліматичного стоку (див. рис.9.3) та виконаних просторово-

часових узагальнень характеристик кліматичного стоку (Н.С. Лобода, 2005).

Норму природного (непорушеного водогосподарською діяльністю) річного стоку  $\bar{Y}_{ПР}$  для малих та середніх річок визначають через норму кліматичного стоку та перехідний коефіцієнт  $K_{ПЕР}$ , який визначається в залежності від географічного положення водозбору за регіональними формулами.

На основі аналізу розрахованих рядів кліматичного стоку отримано математичне співвідношення, яке дозволяє визначати коефіцієнти варіації стоку невивчених річок в залежності від норми кліматичного стоку (Є.Д.Гопченко, Н.С. Лобода, 2005)

$$C_{VK} = \frac{C_{Vm}}{(\bar{Y}_K/10)^{0.60}}, \quad (9.35)$$

де  $C_{VK}$  – коефіцієнт варіації кліматичного річного стоку;

$C_{Vm}$  - максимальне значення коефіцієнта варіації річного стоку, яке відповідає мінімальному значенню кліматичного стоку у межах України ( $\bar{Y}_K = 10 \text{ мм}$ ). У відповідності з емпіричними даними  $C_V = 1,5$ .

Відношення  $C_{SK}/C_{VK}$  та коефіцієнт автокореляції  $r(1)$  беруться згідно із районуванням статистичних параметрів річного стоку за результатами узагальнень, отриманих на основі методу сумісного аналізу.

Після установаження статистичних параметрів розраховуються величини річного природного стоку заданої забезпеченості.

### Контрольні запитання

1. Що називають “кліматичним стоком”?
2. Який стік називається “природним”?
3. Якій величині стоку дорівнює норма річного кліматичного стоку, визначена за картою ізоліній?

## 10 БЛОК РОЗРАХУНКІВ ПОБУТОВОГО СТОКУ ЗА МОДЕЛЛЮ КЛІМАТ-СТІК. ФУНКЦІЇ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ

### 10.1 Обґрунтування стохастичної моделі побутового річного стоку при наявності штучних водойм

Створення штучних водойм з метою багаторічного і переважно сезонного регулювання стоку набуло інтенсивного розвитку наприкінці 50-х та на початку 60-х років минулого сторіччя. Для північно-західного Причорномор'я було характерним створення так званих “копанок”, розташованих в 50-200 м від русел, в які вода закачувалася насосами. Згодом з'ясувалося, що ефективність такого роду споруд невисока. Рівнинна місцевість з ґрунтами, які легко змиваються, примітивні водоскидні споруди привели, кінець кінцем, до замулювання водойм і, отже, до погіршення якості води. В умовах посушливого клімату, з високими теплоенергетичними ресурсами, такі водоймища починають виконувати роль випарників, істотно знижуючи стік річок. Вплив ставків та водосховищ як штучних об'єктів ландшафту можна врахувати таким балансовим співвідношенням

$$W_{\text{ПОБ}} = W_{\text{ПР}} - \Delta W_{\text{ВИП}}. \quad (10.1)$$

Втрати на випаровування з водної поверхні штучних водойм зумовлені різницею між випаровуванням з водної поверхні та поверхні суші

$$\Delta W_{\text{ВИП}} = (E_B - E_C) \sum F_B, \quad (10.2)$$

де  $E_B$  - випаровування з водної поверхні, мм;

$E_C$  - випаровування з поверхні суші, мм;

$\sum F_B$  - сумарна площа водної поверхні штучних водойм при НПР (нормальному підпірному рівні) в межах водозбору.

Різниця  $(E_B - E_C)$  є характеристикою “додаткового випаровування з водної поверхні”, яке зростає в міру переходу із зони достатнього зволоження у зону недостатнього зволоження. Отже втрати на додаткове випаровування стають найбільшими у зоні степів, де випаровування з поверхні суші обмежене запасами вологи у ґрунті, а випаровування з водної поверхні визначається лише випарною здатністю повітря.

Саме ця обставина знаходить своє відображення у ймовірнісній формі запису рівняння (10.1)

$$W_{\text{ПОБ,Р}} = W_{\text{ПР,Р}} - \Delta W_{\text{ВИП,100-Р}}. \quad (10.3)$$

Індекси, що вказують забезпеченість  $P$  для природного та побутового стоку, співпадають, а забезпеченість втрат на додаткове випаровування має протилежне значення і дорівнює  $(100 - P)$ .

Якщо випаровування з поверхні суші  $E_C$  виразити через рівняння водного балансу водозбору, тобто через опади та природний стік, то (10.3) набуде вигляду

$$Y_{\text{ПОБ}}F = Y_{\text{ПР}}(F - \sum F_B) - (E_B - X)\sum F_B, \quad (10.4)$$

де  $Y_{\text{ПОБ}}, Y_{\text{ПР}}$  - побутовий та природний річний стік, мм;

$E_B$  - випаровування з водної поверхні, мм;

$X$  - сумарні опади на водну поверхню, мм;

$F$  - площа водозбору.

Різниця  $(E_B - X)$  підкоряється зональному (широтному) розподілу метеорологічних величин і пов'язана з водністю року. Безпосередньо для моделювання використовувався вираз

$$Y_{\text{ПОБ},P} = Y_{\text{ПР},P}(1 - f_B) - (E_B - X)_{100-P}f_B \quad (10.5)$$

або

$$Y_{\text{ПОБ},P} = Y_{\text{ПР},P}(1 - \alpha_P f_B), \quad (10.6)$$

де  $f_B = \frac{\sum F_B}{F}$  - сумарна площа водної поверхні штучних водойм, виражена в частках від загальної площі водозбору  $F$ ;

$\alpha_P$  - безрозмірний коефіцієнт, представлений у вигляді функції водності року

$$\alpha_P = \frac{602}{Y_{\text{ПР},P}^{1,14}}, \quad (10.7)$$

де  $Y_{\text{ПР},P}$  - шар природного стоку заданої забезпеченості.

У рівнянні (10.6) виконано розділення не випадкової компоненти  $f_B$  і "кліматичної" складової  $\alpha_P = f(Y_P)$ , яка описується статистичним законом розподілу. За своєю сутністю залежності (10.6) та (10.7) описують реальний фізичний зв'язок між втратами річного стоку на додаткове випаровування з водної поверхні та водністю року, яка задається як  $Y_{\text{ПР},P}$ . Чим більше водність року, тим менше втрати на додаткове випаровування з водної поверхні штучних водойм.

Стохастичне моделювання річного побутового стоку виконувалось за (10.6) при різних значеннях  $f_B$ . Для отриманих штучних рядів



визначалися статистичні параметри: середнє арифметичне, коефіцієнт варіації, коефіцієнт асиметрії, для яких були побудовані певні залежності від відносної площі штучних водойм (криві 1 на рис. 10.1).

З отриманих залежностей випливає, що збільшення площ водної поверхні штучних водойм призводить до зменшення середніх багаторічних величин стоку (рис.10.1) й зростання його мінливості (рис.10.2) та асиметрії (рис.10.3). Наслідки антропогенного впливу зростають в міру зменшення водності річки.

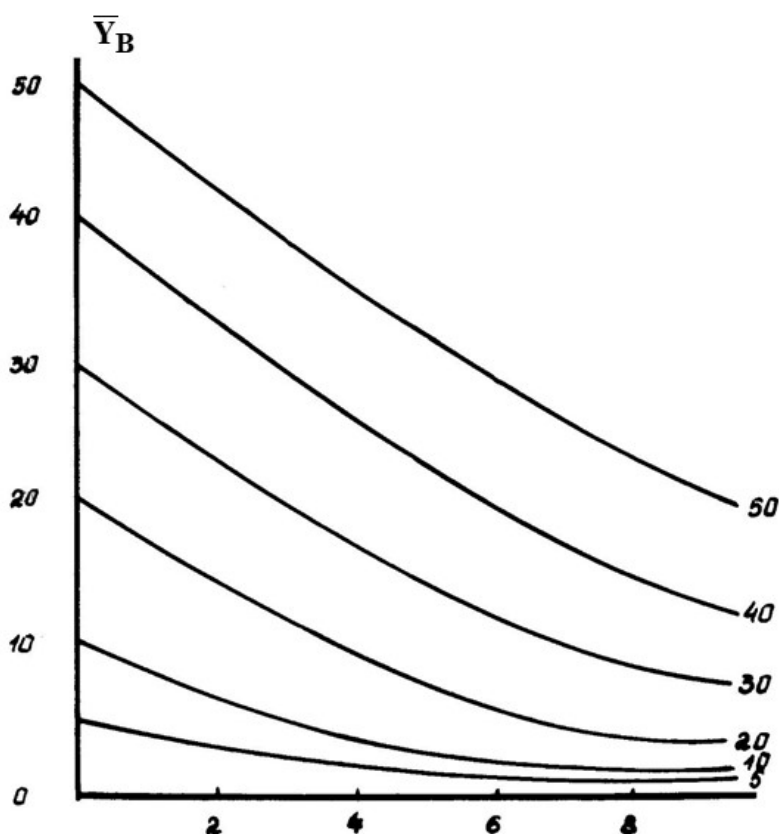


Рисунок 10.1 – Зміна норми річного стоку (мм) при зростанні відносної площі (%) штучних водойм

## 10.2 Обґрунтування стохастичної моделі побутового річного стоку при наявності зрошувальних меліорацій

Рівняння водогосподарського балансу при вилученні вод з поверхневих водотоків для цілей зрошування у варіанті, придатному для стохастичного моделювання, описується виразом (10.8) й представляє собою різницю між об'ємом природного стоку за рік  $W_{ПР}$  та об'ємом вилученої на зрошування води  $W_{ЗР}$

$$W_{ПОВ} = W_{ПР} - \Delta W_{ЗР}. \quad (10.8)$$

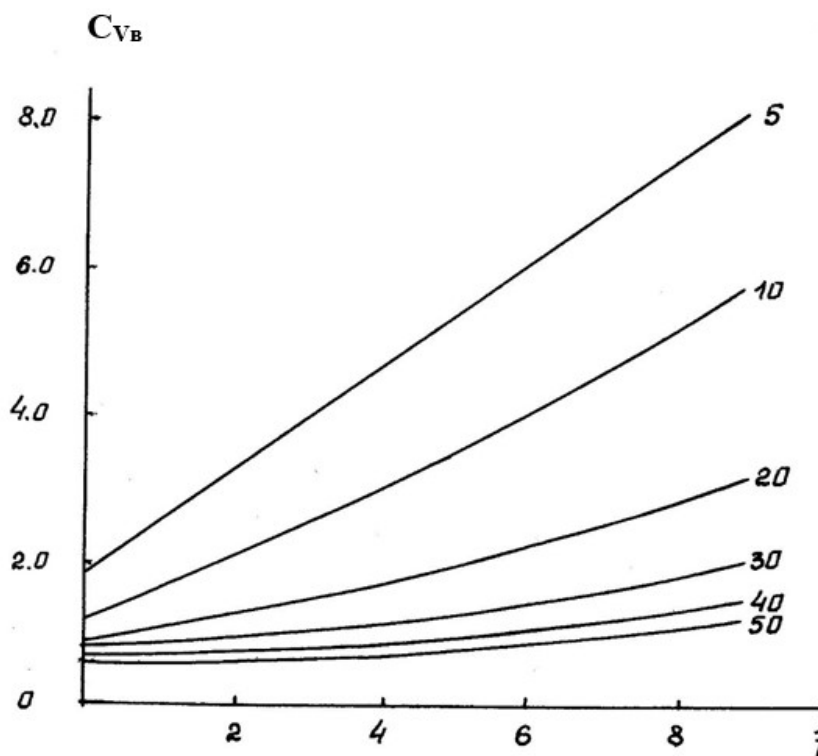


Рисунок 10.2 – Зміна коефіцієнту варіації річного стоку при зростанні відносної площі (%) штучних водойм

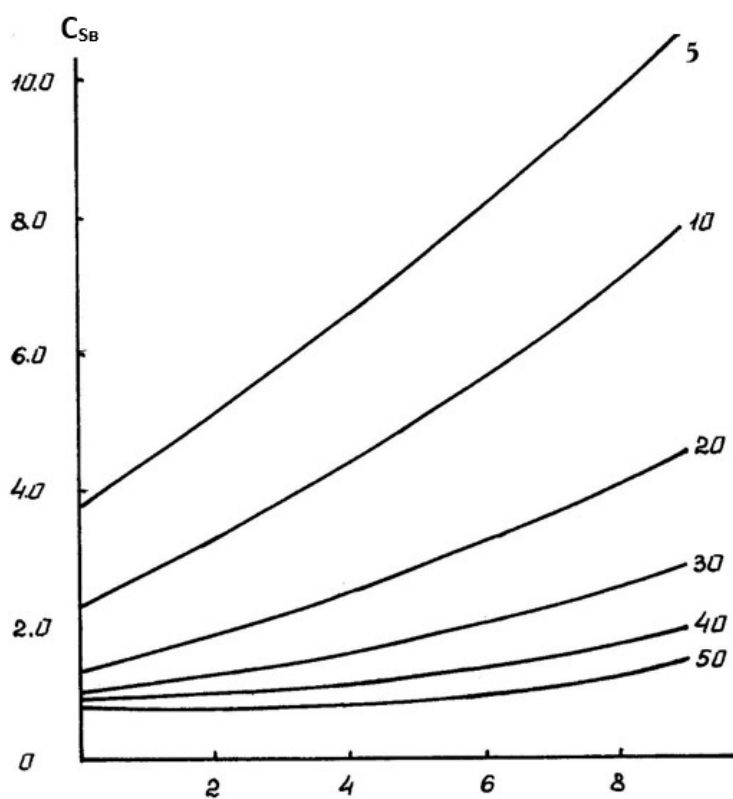


Рисунок 10.3 – Зміна коефіцієнту асиметрії річного стоку при зростанні відносної площі (%) штучних водойм

Об'єм зрошування визначається як шар води, необхідний для оптимального розвитку рослини (зрошувальна норма-нетто)  $M_0$  у заданих кліматичних умовах, помножений на площу зрошуваних земель  $F_{зр}$ . З урахуванням втрат води при роботі зрошувальної системи використовується поняття норми-брутто, яка визначається через коефіцієнт корисної дії зрошувальної системи  $\eta$ .

Необхідна кількість поливної води  $m_0$  визначається за формулою (А.В. Гушля, В.С. Мезенцев, 1982)

$$m_0 = v_0^r E_m - X, \quad (10.9)$$

де  $v_0$  - безрозмірна характеристика середнього зволоження ґрунту за весь період між поливами, при якому розвиток переважаючих на ділянці сільськогосподарських культур відбувається найбільш оптимально;

$r$  - параметр, який залежить від водно-фізичних властивостей ґрунту: для легких ґрунтів  $r = 1,1 \div 1,5$ ; для середніх ґрунтів -  $r = 1,5 \div 2,0$ ; для важких ґрунтів -  $r = 2,0 \div 3,0$ ;

$E_m$  - максимально можливе випаровування за розрахунковий період;

$X$  - атмосферні опади, які випали на зрошувану ділянку за розрахунковий (вегетаційний) період.

Оптимальна відносна вологість ґрунту  $v_0$  встановлюється за рівнянням

$$v_0 = \frac{w_0}{w_{HB}}, \quad (10.10)$$

де  $w_0$  - величина оптимального запасу вологи в розрахунковому шарі ґрунту;

$w_{HB}$  - найменша вологоємність ґрунту цього ж шару.

Різним культурам відповідає різний оптимум зволоження ґрунту. Для таких вологолюбних культур як рис,  $v_0$  звичайно береться рівним  $1,0 \div 1,2$ ; для баштанних та овочевих -  $v_0 = 0,9$ ; для посухостійких зернових культур -  $v_0 = 0,8$ .

Зрошувальна норма-нетто визначається як сума поливних норм за весь період вегетації з розрахунку на середньоструктурний гектар зрошуваних в межах водозбору земель (табл. 10.1)

$$M_0 = \sum m_{0i}. \quad (10.11)$$

Норма-брутто визначається за виразом

$$M_{0,БР} = \frac{M_0}{\eta} \quad (10.12)$$

Таблиця 10.1 – Норми зрошування у роки різної водності

Норми річного кліматичного стоку, мм	Норми зрошування, мм			
	рівень оптимального зволоження ґрунту, $v_0$	маловодні роки	середні за водністю роки	багатоводні роки
10	0,8	375	252	9,6
10	0,9	600	454	273
10	1,0	884	727	493
20	0,8	273	149	5,0
20	0,9	479	354	212
20	1,0	741	563	424
30	0,8	260	131	7
30	0,9	453	293	166
30	1,0	710	520	372

Коефіцієнт варіації зрошувальних норм  $C_{VM_n}$  визначається за емпіричною формулою вигляду

$$C_{VM_0} = \frac{100v_0}{M_n} \quad (10.13)$$

Коефіцієнти асиметрії рядів зрошувальних норм близькі до нуля. Закономірності багаторічних коливань рядів  $M_0$  задовольняють вимогу стаціонарності процесу, а це означає, що до них можна застосувати ті ж математичні схеми, що й при статистичному описі річкового стоку. У зв'язку з цим стохастична генерація рядів зрошувальних норм проводиться як моделювання ряду незалежних випадкових величин, статистичний розподіл яких описується трьохпараметричним гама-розподілом.

Так само, як і при оцінці впливу штучних водойм, антропогенну складову  $\Delta W_{ЗР}$  рівняння (10.8) можна розділити на кліматичну ( $M_0$ ) і антропогенну компоненти ( $f_{ЗР}, \eta$ )

$$\Delta W_{ЗР} = M_{0,БР} F_{ЗР} = \frac{M_0}{\eta} F_{ЗР} \quad (10.14)$$

Щоб урахувати при моделюванні рядів побутового стоку за (10.8)

відповідність стоку і зрошувальних норм по забезпеченості без великих втрат в точності розрахунку, можна використовувати угруповання маловодних (забезпеченість стоку  $P > 75\%$ ), багатоводних ( $P < 25\%$ ) та середніх за водністю ( $25 \leq P \leq 75\%$ ) років (див. табл.10.1). Зокрема, у відповідність величинам річного стоку, які відносяться до групи маловодних років ( $P > 75\%$ ), ставляться зрошувальні норми  $M_0$ , усереднені в інтервалі забезпеченостей  $P < 25\%$ . І, навпаки, значення річного стоку невеликої забезпеченості ( $P < 25\%$ ) комбінуються з середніми значеннями дефіцитів водоспоживання, які мають ймовірність перевищення  $P > 75\%$ . Такий підхід виправдовується реальними фізичними процесами, що відбуваються на водозборі: у посушливі роки зростає дефіцит водоспоживання сільськогосподарських культур, а величини річного стоку зменшуються; у багатоводні роки необхідність у великих витратах води на зрошування відпадає.

Результатами моделювання є так звані “функції відгуку” водозборів на водогосподарські перетворення, представлені у вигляді залежностей статистичних параметрів від рівня водогосподарських перетворень (рис.10.4). Характер побудованих залежностей аналогічний тим, що були одержані при оцінці впливу штучних водойм на параметри річного стоку.

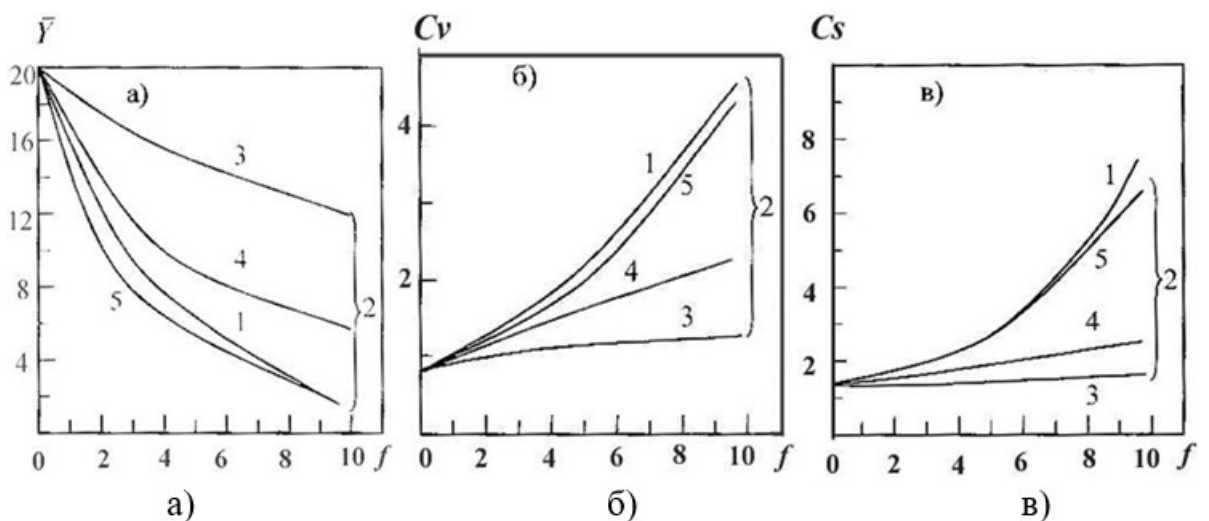


Рисунок 10.4 - Залежності середньобаторічного шару стоку (а), коефіцієнтів варіації (б) і асиметрії (в) рядів побутового стоку від ступеня зарегульованості водозбору штучними водоймами (1) та площ зрошування (2) при різних рівнях  $v_0$ :  $v_0 = 0.8$  (3);  $v_0 = 0.9$  (4);  $v_0 = 1.0$  (5)

Із зростанням величин  $f_{зр}$ ,  $f_B$  відбувається зменшення норми  $\bar{Y}$  і збільшення коефіцієнтів  $C_V$  та  $C_S$ . Причому, ефект впливу господарської діяльності багато в чому визначається зволоженістю території. В міру переходу в посушливі райони природні водні ресурси зменшуються і їхня реакція на один і той же рівень антропогенної дії стає більш

вираженою.

Чим більше оптимальне зволоження ґрунту  $v_0$ , тим більша кількість води повинна бути вилучена з місцевого стоку для забезпечення рослин водою.

### 10.3 Обґрунтування стохастичної моделі побутового річного стоку при наявності зрошувальних меліорацій за рахунок річки-донора

Процес зрошування за рахунок річки-донора, як правило, супроводжується появою зворотних вод.

Зворотні води  $W_{ЗВ}$  виникають за рахунок фільтраційних втрат з водопровідної та водорозподільної мережі при транспортуванні води від річки-донора до водозбору тієї річки, у межах водозбору якої розташовані зрошувані масиви сільськогосподарських культур.

Рівняння водогосподарського балансу при наявності на водозборі зрошуваних земель за рахунок річки-донора записується у такому вигляді

$$W_{ПОВ} = W_{ПР} + \Delta W_{ЗР,СК}, \quad (10.15)$$

де  $\Delta W_{ЗР,СК} = W_{ЗВ}$  - додаткове надходження (скидання) вод річки-донора із зрошуваних сільськогосподарських масивів.

Розрахунки об'єму зворотніх вод спираються на той факт, що з об'єму забраних на зрошування вод  $\Delta W_{ЗР} = \frac{M_0}{\eta} F_{ЗР}$ , на фільтрацію піде частка, яка дорівнює  $(1 - \eta)$ :

$$\Delta W_{ЗР,СК} = W_{ЗВ} = F_{ЗР} \xi (1 - \eta) \frac{M_0}{\eta}, \quad (10.16)$$

де  $\xi$  - коефіцієнт, що показує ту частку фільтраційних вод, які надходять до русла.

Значення  $\xi$  визначається за положенням зрошуваних масивів відносно водоприймача, а також наявністю або відсутністю гідрографічного зв'язку зони зрошування з цією річкою (В.В. Лаликін, О.О. Светличний, О.Є. Солодкий, 1980).

Для невеликих річок, які не дренують водоносні горизонти,  $\xi = 0$ .

Результати чисельних експериментів дозволили встановити, що наявність зворотних вод сприяє збільшенню норм річного стоку і зменшує його мінливість та асиметрію. На рис. 10.5 наведені залежності статистичних параметрів від відносної площі зрошуваних земель, визначені для передгірських річок Кримського півострова, що входять до складу зрошувальної системи Північно-Кримського каналу як водоскиди.

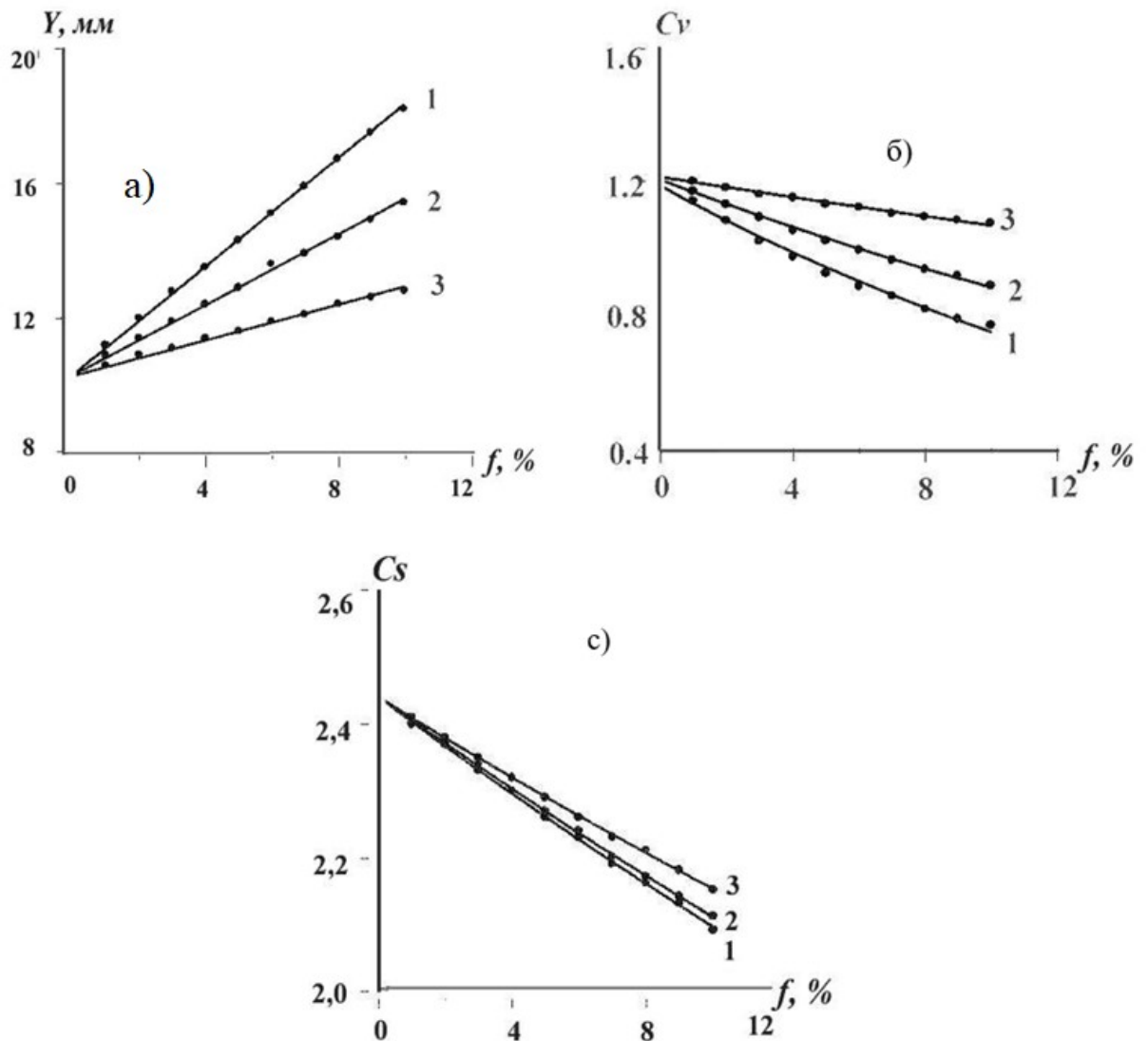


Рисунок 10.5 – Зміна статистичних параметрів річного стоку при наявності на водозборах сільськогосподарських масивів, які зрошуються за рахунок річок-донорів: а) шар стоку; б) коефіцієнт варіації; в) коефіцієнт асиметрії

#### 10.4 Обґрунтування стохастичної моделі побутового річного стоку при наявності осушувальних меліорацій

При дослідженні змін стоку на меліорованих водозборах найбільш схожі висновки щодо меженного стоку: осушування боліт сприяє вирівнюванню внутрішньорічного розподілу стоку – збільшенню мінімальних витрат стоку за меженні періоди. Це пояснюється покращенням процесу стікання поверхневих та підземних вод в перетворену осушувальними каналами руслову мережу. Більшість одержаних висновків про вплив осушування боліт заснована на зіставленні спостережень за стоком меліорованих водозборів і водозборів в природних

умовах. Достовірність таких результатів визначається тривалістю спостережень за стоком в періоди природного та порушеного господарською діяльністю водного режиму. Другий напрям робіт по дослідженню впливу осушування боліт на стік річок пов'язаний з диференційованим підходом до чинників, які визначають стік з осушених водозборів. При цьому розглядається рівняння водогосподарського балансу водозбору, згідно з яким зміну об'єму річного стоку під впливом осушування боліт  $\Delta W_{OC}$  можна представити таким чином

$$\Delta W_{OC} = \Delta W_{СП} \pm \Delta W_{ЕБ}, \quad (10.17)$$

де  $\Delta W_{СП}$  - об'єм спрацювання вікових запасів підземних вод;

$\Delta W_{ЕБ}$  - зміни об'єму води за рахунок зміни випаровування з поверхні суші на водозборі в результаті осушування боліт.

Об'єм спрацювання (км<sup>3</sup>) представляється у вигляді

$$\Delta W_{СП} = (Y_{ПОВ,OC} F_{Б,OC} + Y_{сух} F_{сух}) \cdot 10^{-3}, \quad (10.18)$$

де  $Y_{ПОВ,OC}$  - шар спрацьованості болотних вод, м;

$Y_{сух}$  - шар спрацьованості болотних вод з осушених суходолів, м;

$F_{Б,OC}$  - площа осушених боліт та заболочених земель, км<sup>2</sup>;

$F_{сух}$  - площа суходолів, які прилягають до боліт і знаходяться під впливом осушування, км<sup>2</sup>.

Шар води, який спрацьовується в руслову мережу в результаті зменшення вологості верхнього шару ґрунтів при зниженні рівня води на болоті, визначається за виразом

$$Y_{\Delta H} = \Delta H_{OC} (w_{np} - w_{oc}); \quad (10.19)$$

$$\Delta H_{OC} = (H_{ПР} - H_{OC}), \quad (10.20)$$

де  $H_{ПР}, H_{OC}$  - середні річні рівні болотних вод відповідно до і після осушування, м;

$\Delta H_{OC}$  - зміна середнього рівня ґрунтових вод в результаті осушування, м;

$w_{np}$  - об'ємна вологість торф'яного шару до осушування.

$w_{oc}$  - об'ємна вологість торф'яного шару після осушування.

Шар води, який надходить до меліоративної системи з прилеглих суходолів, за цією же методикою оцінюється таким чином



$$Y_{\text{сух}} = \Delta H_{\text{сух}} \mu, \quad (10.21)$$

де  $\Delta H_{\text{сух}}$  - середнє значення зниження рiвня ґрунтових вод на прилеглих дiлянках суходолу, м;

$\mu$  - коефiцiєнт водовiддачi ґрунтiв.

Найбiльшi труднощi виникають при визначеннi  $\Delta H_{\text{сух}}$  i  $F_{\text{сух}}$ . Площа суходолiв, що знаходяться пiд впливом осушування, перш за все визначається шириною зони впливу мелiорацiй на навколишнi територiї, яка залежно вiд гiдрогеологiчних умов змiнюється в широких межах. Ширина зони впливу осушування при зниженнi рiвня води на болотi на 1,0-1,5 м задається для рiзних ґрунтiв прилеглих територiй. Вказанi данi можуть бути застосованi для визначення наближених значень  $\Delta H_{\text{сух}}$  та  $F_{\text{сух}}$ .

Об'єм втрат води за рахунок змiни випаровування в басейнi визначається за формулою

$$\Delta W_{EB} = (E_B - E_{OC}) F_{OC} \cdot 10^{-6}, \quad (10.22)$$

де  $E_B$  - випаровування з неосушеного болота, мм;

$E_{OC}$  - випаровування з осушеного болота, мм;

$F_{OC}$  - площа осушених земель, км<sup>2</sup>.

На раннiх етапах дослiдження впливу осушування болiт на стiк рiчок допускалося, що спрацювання запасiв пiдземних вод вiдбувається тiльки в першi роки пiсля проведення осушувальних мелiорацiй. Як показали дослiдження Я.О. Мольчака (1999), за наявностi напiрних вод стабiлiзацiї рiвня ґрунтових вод в процесi осушування не настає, оскiльки спостерiгається додатковий приплив напiрних мiжпластових вод у верхнi водоноснi горизонти. Саме з цiєї причини проведення мелiоративних робiт в зонi болiт Полiської низовини призвело до змiни взаємозв'язку рiчкових i пiдземних вод в системi рiчкова мережа - пiдземний приплив. За даними Я.О. Мольчака (1999), практично на всiх рiчкових системах з осушувальними мелiорацiями спостерiгається збiльшення рiчного стоку. При цьому домiнуюча роль належить пiдземнiй складовiй.

Роль змiни випаровування  $\Delta W_{EB}$  з поверхнi сушi при проведеннi осушувальних робiт у балансовому рiвняннi (10.22) визначається характером освоєння осушених болiт. Безпосереднiй вплив осушування i освоєння болiт на процеси випаровування пов'язаний iз зменшенням вологостi торф'яного ґрунту пiсля зниження рiвня ґрунтових вод, змiною виду рослинностi i змiною здатностi до транспiрацiї. Доцiльно розглянути випаровування на болотах неосушених, осушених, але не освоєних i на освоєних пiд посiви сiльськогосподарських культур. За величину

випаровування з неосушених торф'яників багатьма авторами бралося випаровування з водної поверхні. За весь період вегетації сумарне випаровування з торф'яників і водної поверхні відрізняється мало, але в період посиленої транспірації випаровування з торф'яників вище, ніж випаровування з водної поверхні.

Тільки весною внаслідок достатнього зволоження ґрунтів і незначної транспірації величина випаровування з осушених і неосушених боліт практично не відрізняється. Влітку випаровування на осушених, але не освоєних болотах та його сума за теплий період (квітень – вересень) зменшується в середньому на 10-15 %, а в особливо посушливі місяці і при глибокому розташуванні ґрунтових вод – до 40 %. Це пов'язано не тільки з пониженням дзеркала ґрунтових вод при осушуванні, але й зі зменшенням транспірації прорідженого, виродженого травостою. При освоєнні осушених боліт випаровування знову зростає за рахунок транспірації вологи сільськогосподарськими культурами. Слід зазначити, що сільськогосподарські культури при своєму розвитку споживають набагато більше вологи, ніж природна болотна рослинність. Так, для природної болотної рослинності транспірація складає 10-25 % від сумарного випаровування, а для культурних трав – 90 %. Випаровування на освоєних болотах залежить від ступеня регулювання ґрунтової вологи гідромеліоративними заходами. Якщо система осушування передбачає поповнення запасів вологи зони аерації до максимального рівноважного вологоутримання, то випаровування з поверхні осушених боліт збільшується в порівнянні з неосушеними болотами для культур з підвищеним оптимальним зволоженням ґрунту (трави, овес, ячмінь, конопля). Якщо ж оптимальне зволоження, необхідне для розвитку даної культури, невелике (буряк, картопля), то випаровування з осушених і освоєних боліт може виявитися навіть меншим, ніж випаровування з неосушеного болота. Якщо осушування глибоке і додаткового зволоження у вегетаційний період немає, то випаровування з поверхні освоєного болота зменшуватиметься в порівнянні з неосушеним.

Зміна шару річного стоку в результаті осушення боліт, згідно з (10.22), буде дорівнювати різниці між випаровуванням з боліт і випаровуванням з осушеної і освоєної території.

Виходячи з наведених вище міркувань, для врахування впливу заболоченості на величину випаровуваності запропонована формула виду

$$\bar{Y}_{f_k} = Y_{f_k=0} - (\bar{E}_B - \alpha_1 \bar{E}_C) f_B \quad (10.23)$$

або

$$k_B = 1 - k_{3B} \frac{F_B}{F}, \quad (10.24)$$

де  $k_B = \frac{\bar{Y}f_B}{\bar{Y}_{f_B=0}}$  - коефіцієнт, який дорівнює відношенню норми стоку із заболоченого водозбору з площею боліт  $F_B$ , до норми стоку з незаболоченого басейну  $F$ ;

$f_B$  - відносна площа, зайнята болотами.

$k_{3B}$  - коефіцієнт додаткового випаровування, який дорівнює

$$k_{3B} = \frac{\bar{E}_B - \alpha_1 \bar{E}_C}{\bar{Y}_{f_B=0}} \quad (10.25)$$

і є характеристикою надмірного випаровування з поверхні суші;

$\bar{E}_B$  - середньобаторічне випаровування з боліт;

$\bar{E}_C$  - середньобаторічне випаровування з суходолів;

$\alpha_1$  - коефіцієнт, який залежить від сівообороту освоєваної території;

$\bar{Y}_{f_B=0}$  - середньобаторічний шар стоку з незаболочених територій.

Коефіцієнт  $k_B$  може бути як більше, так і менше за 1, залежно від виду сільськогосподарських культур на освоєних болотах.

Описані вище результати і висновки багатьох авторів дозволяють підсумувати, що осушувальні меліорації сприяють збільшенню середнього багаторічного річного стоку. Це відбувається за рахунок спрацювання запасів ґрунтових вод, збільшення густоти річкової мережі, зменшення тривалості затоплення заплав і деяких інших чинників.

Як вже наголошувалося, складову водогосподарського балансу при осушуванні боліт на водозборах  $\Delta W_{СП}$  можна представити у вигляді трьох доданків. Перший зумовлений безпосередньо зниженням рівня ґрунтових вод, другий – втратами вологи за рахунок зменшення вологості верхнього шару покладу торфу при зниженні рівня води на болоті, третій – змінами випаровування на осушених водозборах.

На прикладі західної частини Українського Полісся встановлено, що в зоні надмірного та достатнього зволоження роль додаткових втрат на випаровування з поверхні боліт невелика і в більшості випадків знаходиться в межах точності розрахунку середніх багаторічних величин річного стоку (Н.С. Лобода, О.І. Шаменкова, 2002).

У зв'язку з цим прийнято розглядати рівняння водогосподарського балансу тільки з урахованням перших двох складових.

Рівняння водогосподарського балансу в умовах осушування боліт, покладене в основу детерміновано-стохастичної моделі, можна представити у вигляді (Н.С. Лобода, 2005)

$$Y_{OC} = Y_{PP} + \mu \Delta H_{ГР} f_{OC} + (w_{PP} - w_{OC}) \Delta H_{ГР} f_{OC}, \quad (10.26)$$

де  $Y_{OC}$  - шар стоку з водозбору, на якому вживаються заходи щодо осушування боліт;

$Y_{ПР}$  - шар стоку з боліт в непорушених господарською діяльністю умовах (природний);

$\mu$  - коефіцієнт водовіддачі ґрунтів, який оцінюється як різниця між повною і найменшою вологоємністю, поділеною на товщину даного шару;

$\Delta H_{ГР}$  - зміна середнього рівня ґрунтових вод в результаті осушування;

$f_{OC}$  - показник меліорованості території;

$w_{ПР}$  - об'ємна вологість торф'яного покладу до осушування;

$w_{OC}$  - об'ємна вологість торф'яного покладу після осушування.

Середньобагаторічна величина  $\Delta H_{ГР}$  визначалася відповідно до прийнятих норм осушування мінеральних ґрунтів і торф'яників (табл.10.2; 10.3). При цьому під нормою осушування слід розуміти шар ґрунту, звільнений від надлишку води і аерований до рівня, який забезпечує нормальний розвиток рослин.

Таблиця 10.2 – Норми осушування мінеральних ґрунтів, м

Культури	Передпосівний період	Вегетаційний період	
		піщані та супіщані ґрунти	суглинні та глинисті ґрунти
Лугові трави	0,30-0,40	0,60-0,70	0,70-0,80
Трави на пасовищі	0,40-0,50	0,70-0,75	0,75-0,85
Зернові	0,40-0,50	0,70-0,80	0,80-0,90
Просап, овочеві, технічні	0,50-0,60	0,80-0,90	0,90-1,00

Таблиця 10.3 – Норми осушування торф'яників, м

Культури	Передпосівний період	Вегетаційний період	
		піщані та супіщані ґрунти	суглинні та глинисті ґрунти
Лугові трави	0,40-0,50	0,70-0,80	0,80-1,00
Трави на пасовищі	0,50-0,60	0,70-0,80	0,55-1,00
Зернові	0,50-0,60	0,80-0,90	1,10-1,20
Просап, овочеві, технічні	0,60-0,70	0,90-1,00	1,20-1,30

Слід зазначити, що норми осушування залежать від біологічних особливостей рослин, водно-фізичних властивостей ґрунту, фази розвитку рослин і пори року. Аерований шар ґрунтів береться таким, щоб коренева система рослини розвивалася на нормальну глибину. Норми осушування визначаються також і загальною зволоженістю року. У багатоводні роки ( $P < 25\%$ ) норми осушування на 0,20-0,30 м більші, ніж в середні, а в посушливі ( $P > 75\%$ ) – на 0,10-0,30 м – менше. Крім того, норми осушування різні в передпосівний та вегетаційний періоди. Для болотних ґрунтів, особливо торф'яників, які глибоко залягають, норми осушення більші, ніж для мінеральних, характерних, наприклад, для Житомирського Полісся. У свою чергу, для важких мінеральних ґрунтів з високим капілярним рівнем підняття норми осушування вищі, ніж для легких, які не мають цієї властивості. Всі ці обставини повинні бути враховані в розрахунках за (10.26).

Як вже наголошувалося, зміни підземного, а отже, й сумарного річного стоку визначаються також зниженням запасів вологи в ґрунтах ( $w_E - w_{OC}$ ). Для Західного Полісся середню об'ємну вологість боліт і заболочених територій в природних умовах можна вважати рівною 88 %, а її характеристика після осушування і освоєння боліт визначається видом вирощуваної сільськогосподарської культури. Наприклад, допустима об'ємна вологість ґрунту для зернових культур становить 40-50 %, для овочевих - 70-80 %, картоплі і коренеплодів – 60-70 %, польових багаторічних трав – 70-80 %, лугових трав – 80-90% від повної вологості. Переважаюча частина меліорованих земель використовується в сільськогосподарському виробництві, при цьому на потужних і середніх торф'яниках багаторічні трави займають приблизно 50 % площі, а на дрібних торф'яниках - 63-75 %, тобто  $(w_E - w_{OC}) = 3\%$  для більшої частини осушених і освоєних боліт даної території.

На базі цієї схеми створена імітаційна стохастична модель, яка дозволяє визначати ймовірнісні характеристики побутового стоку водозборів, на яких проводиться осушування. Рівняння водогосподарського балансу (10.26) може бути представлено у ймовірнісній формі (10.27). При цьому вважається, що величини  $Y_{ПР}$  і  $\Delta H_{ГР}$  підпорядковуються одному і тому ж статистичному закону розподілу

$$Y_{OC,P} = Y_{ПР,P} + \mu \Delta H_{ГР,P} f_{OC} + (w_{ПР} - w_{OC}) \Delta H_{ГР,P} f_{OC}, \quad (10.27)$$

де  $P$  - забезпеченість (ймовірність перевищення) заданої водності року.

З метою урахування при моделюванні рядів побутового стоку відповідності стоку і норм осушування по забезпеченості, використовувалися групи маловодних (забезпеченість стоку  $P > 75\%$ ), багатоводних ( $P < 25\%$ ) і середніх по водності ( $25 \leq P \leq 75\%$ ) років.

В результаті одержані залежності статистичних параметрів

побутового стоку від відносних площ осушування для різних видів сільськогосподарських культур.

Одержані результати показують, що при збільшенні площ осушення відбувається збільшення середньобаторічних величин річного стоку, а коефіцієнти варіації й асиметрії зменшуються, причому інтенсивність зміни стоку посилюється у міру зниження загальної водності водозбору.

### **Контрольні запитання.**

1. Стік, яких великих річок використовується для зрошування сільськогосподарських полів Північно-Західного Причорномор'я?
2. Як впливає зрошування за рахунок місцевого стоку на середню багаторічну величину річного стоку?
3. Як впливає зрошування за рахунок річок-донорів на середню багаторічну величину річного стоку?
4. Що являє собою додаткове випаровування з поверхні штучних водойм?
5. Як впливає додаткове випаровування з поверхні штучних водойм на середню багаторічну величину річного стоку?

## 11 МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНОГО ТА ПОБУТОВОГО РІЧНОГО СТОКУ НА БАЗІ ІМІТАЦІЙНОЇ СТОХАСТИЧНОЇ МОДЕЛІ “КЛІМАТ-СТІК” ЗА ДАНИМИ КЛІМАТИЧНИХ СЦЕНАРІЇВ

Модель “клімат-стік” дозволяє виконувати розрахунки річного зонального кліматичного стоку за метеорологічними даними сценаріїв змін глобального та регіонального клімату. Базовою є формула

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E}_m \left[ 1 + \left( \frac{\bar{X}}{\bar{E}_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (11.1)$$

де  $\bar{Y}, \bar{X}, \bar{E}_m$  – середні багаторічні величини річного стоку, опадів та теплоенергетичного еквівалента, мм.

Розрахункова формула (11.1) для визначення середньої багаторічної величини річного стоку за даними кліматичних сценаріїв приймає вигляд:

$$\bar{Y}'_K = (\bar{X} \pm \Delta\bar{X}) - \bar{E}'_m \left[ 1 + \left( \frac{\bar{X} \pm \Delta\bar{X}}{\bar{E}'_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (11.2)$$

де  $\bar{Y}'_K$  – норма кліматичного річного стоку в змінених кліматичних умовах згідно із обраним сценарієм, мм;

$\bar{X}$  – базова (установлена до початку значущих змін клімату) норма річних опадів, мм;

$\Delta\bar{X}$  – зміна сумарних опадів за сценарієм;

$\bar{E}'_m$  – норма максимально можливого випаровування у сценарних кліматичних умовах.

Теплоенергетичний еквівалент або максимально можливе випаровування визначається з урахуванням змін температур літнього сезону (травень-вересень) за даними кліматичного сценарію

$$\bar{E}'_m = 13,3 \frac{IX}{V} \overline{(T_M + \Delta T)} - 307, \quad r = 0,94; \quad (11.3)$$

де  $\Delta T$  - сумарна зміна температур повітря за літній сезон (з травня по вересень включно) для заданого сценарію.

Було досліджено чутливість кліматичного стоку, розрахованого за моделлю “клімат - стік”, до змін метеорологічних характеристик. На основі

числових експериментів встановлено, що зміна норм річного кліматичного стоку стає значущою при зміні річних опадів на  $\pm 3,5\%$  за рік або при зміні сум середньомісячних температур повітря за період червень-серпень на  $\pm 2,5^\circ\text{C}$ . Розгляд різних сценаріїв змін клімату показав, що прогнозоване зростання температур повітря у вказані місяці за період 2021-2050рр. суттєво перевищує заданий поріг.

Коефіцієнт варіації рівнинних водозборів визначається за формулою, яка відображає зв'язки між багаторічною мінливістю річного стоку (коефіцієнтом варіації  $C_V$ ) та нормою річного природного стоку  $\bar{Y}_{\text{ПР}}$ :

$$C_V = \frac{1,5}{\left(\frac{\bar{Y}_{\text{ПР}}}{10}\right)^{0,62}}, \quad (11.4)$$

де  $C_V$  – коефіцієнт варіації природного річного стоку.

Коефіцієнт асиметрії призначається за районуванням відношення коефіцієнта асиметрії до коефіцієнта варіації  $C_S/C_V$  (табл. 11.1).

Таблиця 1.11 – Районування відношення  $C_S/C_V$  річного стоку річок України

№	Район	Середнє значення відношення $C_S/C_V$
1	Західна частина басейну р.Тиси	1,4
2	Східна частина басейну р.Тиси та верхів'я р.Прут	0,6
3	Гірська частина водозбору р.Дністер	2,0
4	Лівобережні притоки до впадіння р. Стрипа	3,0
5	Водозбір р.Прип'ять, правобережні притоки Дніпра, лісостепова частина водозбору р.Південний Буг, лісостепова частина річки Дністер	1,5
6	Водозбір р.Десна	3,00
7	Водозбори річок Трубеж, Сула, Псел та Ворскла	1,00
8	Водозбори річок Приазов'я та р. Сіверський Донець	1,50
9	Водозбори рр.Орель, Самара, Базавлук, Конка	1,27
10	Річки степової зони Молдови й північно-західного Причорномор'я	1,70



Алгоритм оцінки змін характеристик природного річного стоку за моделлю “клімат-стік” на базі даних кліматичних сценаріїв має наступну послідовність.

1. Визначення природного річного стоку для кліматичних умов минулого сторіччя (до початку 90-х), які розглядаються як **базові**.

2. Установлення змін кліматичних чинників формування стоку за обраним сценарієм глобального потепління та за обраний розрахунковий період.

3. Розрахунки середніх багаторічних величин річного кліматичного стоку за метеорологічними даними сценарію за (11.2).

4. Побудова карти ізолій норм річного кліматичного стоку у сценарних кліматичних умовах.

5. Виділення розрахункового водозбору на побудованій карті ізолій та визначення середньої багаторічної величини річного кліматичного стоку з водозбору.

6. Розрахунки середніх багаторічних величин природного річного стоку для малих та середніх водозборів з використанням коефіцієнту переходу від кліматичного стоку до природного.

7. Визначення коефіцієнтів варіації та асиметрії річного стоку у нових кліматичних умовах.

8. Розрахунки стоку річок у роки різної водності за обраним статистичним законом розподілу (Пірсона III, трьохпараметричний гамма-розподіл).

9. Оцінки змін характеристик стоку та кліматичних чинників його формування надавалась у вигляді відносних відхилень  $\delta$  середніх багаторічних величин, які спостерігались до 1989р. (базовий період) та у розрахунковий (сценарний) період:

$$\delta = \frac{\overline{X}' - \overline{X}}{\overline{X}}, \quad (11.4)$$

$$\delta = \frac{\overline{E}_m' - \overline{E}_m}{\overline{E}_m}, \quad (11.5)$$

$$\delta = \frac{\overline{Y}_K' - \overline{Y}_K}{\overline{Y}_K}, \quad (11.6)$$

де  $\overline{X}'$  – середня багаторічна величина річних сум опадів, розрахована за сценарними даними, мм;

$\overline{X}$  – середня багаторічна величина річних сум опадів, розрахована за даними до 1989 р. (до початку значущого впливу глобального потепління), мм;

$\overline{E_m}'$  – середня багаторічна величина максимально можливого випаровування, розрахована за сценарними даними, мм;

$\overline{E_m}$  – середня багаторічна величина максимально можливого випаровування, розрахована за даними до 1989 р. (до початку значущого впливу глобального потепління), мм;

$\overline{Y_K}'$  – середня багаторічна величина річного кліматичного стоку, розрахована за сценарними даними, мм;

$\overline{Y_K}$  – середня багаторічна величина річного кліматичного стоку, розрахована за даними до 1989 р. (базовий період, до початку значущого впливу глобального потепління).

Як вже зазначалось, особливістю моделі «клімат-стік» є те, що у блоці розрахунків побутового (перетвореного водогосподарською діяльністю) стоку входними є статистичні параметри природного стоку, які визначались за метеорологічними даними. Природний стік у свою чергу може визначатися як для сучасних кліматичних умов, так і сценарних. Функції антропогенного впливу представляються у вигляді наборів коефіцієнтів антропогенного впливу обраного чинника водогосподарської діяльності (зрошування, осушування, додаткового випаровування з поверхні штучних водойм та інше) на статистичні параметри річного стоку  $\bar{Y}, C_V, C_S$  у сценарних кліматичних умовах, які визначені згідно із алгоритмом, описаним вище. Коефіцієнти антропогенного впливу залежать головним чином від масштабів кожного розглядуваного виду антропогенної діяльності. Сумарний вплив різних чинників визначається через коефіцієнт їх сумісної дії, наприклад

$$\bar{Y}_{\text{ПОБ}}' = \bar{Y}'_{\text{ПР}} [k_{\bar{Y}}' + k_{\bar{Y}}'' - 2], \quad (11.7)$$

$$C_{V\text{ПОБ}}' = C_{V\text{ПР}}' [k_{C_V}' + k_{C_V}'' - 2], \quad (11.8)$$

$$C_{S\text{ПОБ}}' = C_{S\text{ПР}}' [k_{C_S}' + k_{C_S}'' - 2], \quad (11.9)$$

де  $\bar{Y}'_{\text{ПР}}, C_{V\text{ПР}}', C_{S\text{ПР}}'$  статистичні параметри природного стоку у сценарних кліматичних умовах;

$k_{\bar{Y}}', k_{C_V}', k_{C_S}'$  – коефіцієнти впливу додаткового випаровування з поверхні штучних водойм на статистичні параметри річного побутового стоку  $\bar{Y}_{\text{ПОБ}}', C_{V\text{ПОБ}}', C_{S\text{ПОБ}}'$ , відповідно;

$k_{\bar{Y}}'', k_{C_V}'', k_{C_S}''$  – коефіцієнти впливу зрошування за рахунок місцевих водних ресурсів на статистичні параметри річного побутового стоку  $\bar{Y}_{\text{ПОБ}}', C_{\text{ПОБ}}', C_{\text{ПОБ}}'$ , відповідно;

$k_{\bar{Y}}'', k_{C_V}'', k_{C_S}''$  – коефіцієнти впливу зрошування із річки-донора на

статистичні параметри річного побутового стоку  $\bar{Y}_{ПОВ}, C_{ПОВ}, S_{ПОВ}$ , відповідно.

Базовим називається період, відносно якого розраховуються зміни характеристик природних ресурсів, які відбулися внаслідок глобального потепління. У даній роботі базовим є період гідрометеорологічних спостережень до 1989 року, оскільки у роботі, показано, що після 1989р. зміни температур повітря на території рівнинної України набули статистичної значущості і почали впливати на формування стоку, а сам 1989р. вважається переламним.

Карта розподілу ізолій середніх багаторічних величин (норм) кліматичного стоку (рис. 11.1), розрахованого за (11.1), побудована на топографічній основі 1:500000 для рівнинної території України і кліматичних умов минулого сторіччя, коли вплив змін глобального клімату ще не був значущим (до 1989 р.). У межах гідрологічної зони недостатньої водності, розташування ізолій  $\bar{Y}_K$  для базового періоду показує зменшення цих величин з півночі на південь у діапазоні 60-20 мм.



Рисунок 11.1 – Просторовий розподіл норм річного кліматичного стоку на території України за даними до 1989р.

Важливе значення при оцінках змін водних ресурсів внаслідок потепління клімату відіграє дослідження динаміки змін показників зволоженості (посушливості) клімату, серед яких часто використовується співвідношення кількісних характеристик зволоження та тепла. Як характеристика зволоження використовуються середні річні опади, як характеристика тепла – величина потенційного випаровування. Характеристикою потенційного випаровування може слугувати величина теплоенергетичного еквіваленту або максимально можливого випаровування  $\bar{E}_m$ , визначена за моделлю «клімат-стік». Таким чином індекс зволоженості (посушливості) може бути розрахованим наступним

ЧИНОМ

$$\beta_X = \frac{\bar{X}}{E_m}, \quad (11.10)$$

де  $\bar{X}$  - середнє багаторічне значення річних сум опадів, мм;  
 $E_m$  - середнє багаторічне значення максимально можливого випаровування (теплоенергетичний еквівалент), мм.

За величиною  $\beta_X$  виділяються такі області зволоженості (посушливості)

$$\beta_X \geq 1,0 - \text{зона надмірного зволоження}, \quad (3.40)$$

$$0,8 \leq \beta_X < 1,0 - \text{зона достатнього зволоження}, \quad (3.41)$$

$$0,5 \leq \beta_X < 0,8 - \text{зона недостатнього зволоження}, \quad (3.42)$$

$$0,2 \leq \beta_X < 0,5 - \text{напіваридна зона}, \quad (3.43)$$

$$0,03 \leq \beta_X < 0,2 - \text{аридна зона}, \quad (3.44)$$

$$\beta_X < 0,03 - \text{гіпераридна зона}. \quad (3.45)$$

Значення  $\beta_X=0,5$  розглядається як межа між зоною недостатнього зволоження та напіваридною зоною. Розташування території нижче ізолінії  $\beta_X < 0,5$  означає, що вона знаходиться в напіваридній зоні. До початку значущого впливу змін клімату на термічний режим України (до 1989р.) напіваридна зона займала вузьку стрічку на території узбережжя північно-західного Причорномор'я та Нижнього Подніпров'я (рис. 11.2).

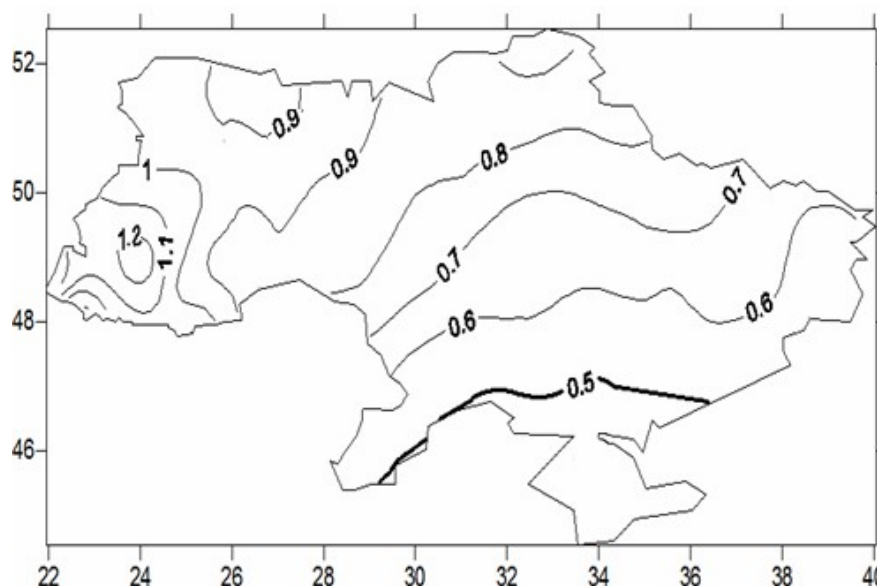


Рисунок 11.2 – Просторовий розподіл показника зволоженості/ посушливості  $\beta_X$ , визначеного за даними до 1989 року (до початку значущого впливу глобального потепління)

Прогнозований за сценарієм RCP8.5 просторовий розподіл показника зволоженості/ посушливості (рис. 11.3) показує, що напіваридна зона буде розширюватись та підніматись до півночі.

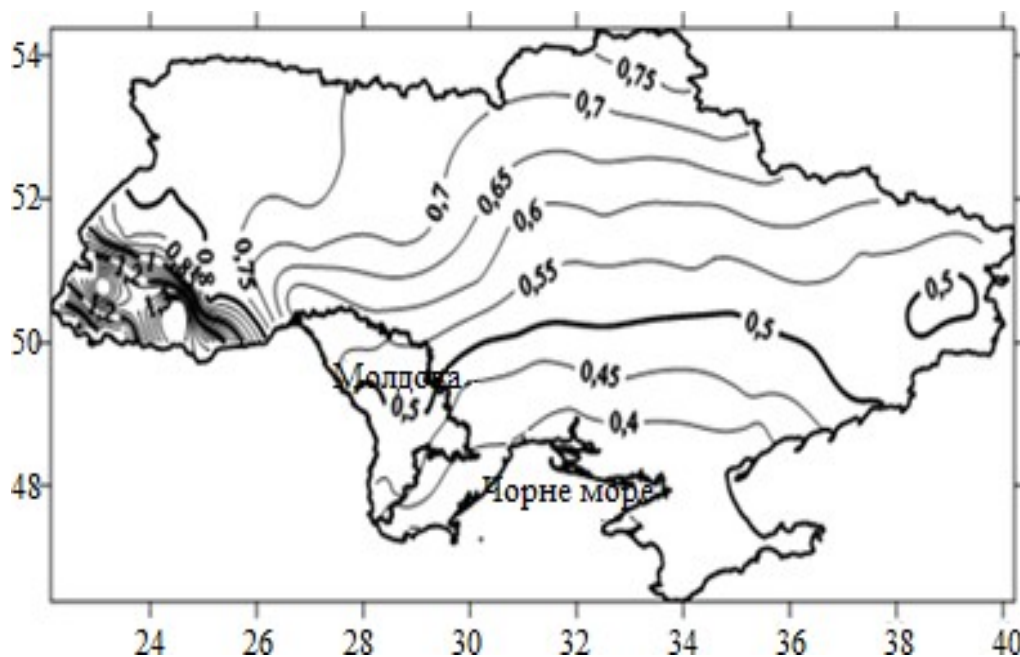


Рисунок 11.3 – Просторовий розподіл показника зволоженості/ посушливості, визначеного за даними сценарію RCP8.5 (осереднена модельна траєкторія) для періоду 2021-2050 рр.

Для прогнозування стану водних ресурсів за кліматичними сценаріями можна використовувати розроблені карти ізолій змін характеристик річного кліматичного стоку як це показано на рисунках 11.4 та 11.5.

Наприклад, розрахунки характеристик кліматичного, природного та перетвореного водогосподарською діяльністю (побутового) річного стоку з водозборів північно-західного Причорномор'я відбувалося за таким алгоритмом.

1. Виділення водозбору досліджуваної річки та визначення за картою ізолій для заданого сценарію (наприклад, з використанням карт у значення зміни річного кліматичного стоку обраного водозбору методом зважування за частинними площами.
2. Визначення середнього багаторічного річного кліматичного стоку у сценарних умовах шляхом введення прогнозованих змін (рис.11.4, рис.11.5) до базового кліматичного стоку.
3. Розрахунки середньої багаторічної величини природного (непорушеного водогосподарською діяльністю) річного стоку у кліматичних умовах заданого сценарію на базі урахування впливу підстильної поверхні для річок з нестійким підземним живленням.

4. Визначення показників водогосподарської діяльності на водозборі.
5. Розрахунки характеристик перетвореного водогосподарською діяльністю (побутового) стоку на основі визначення коефіцієнтів антропогенного впливу за розробленими рівняннями.

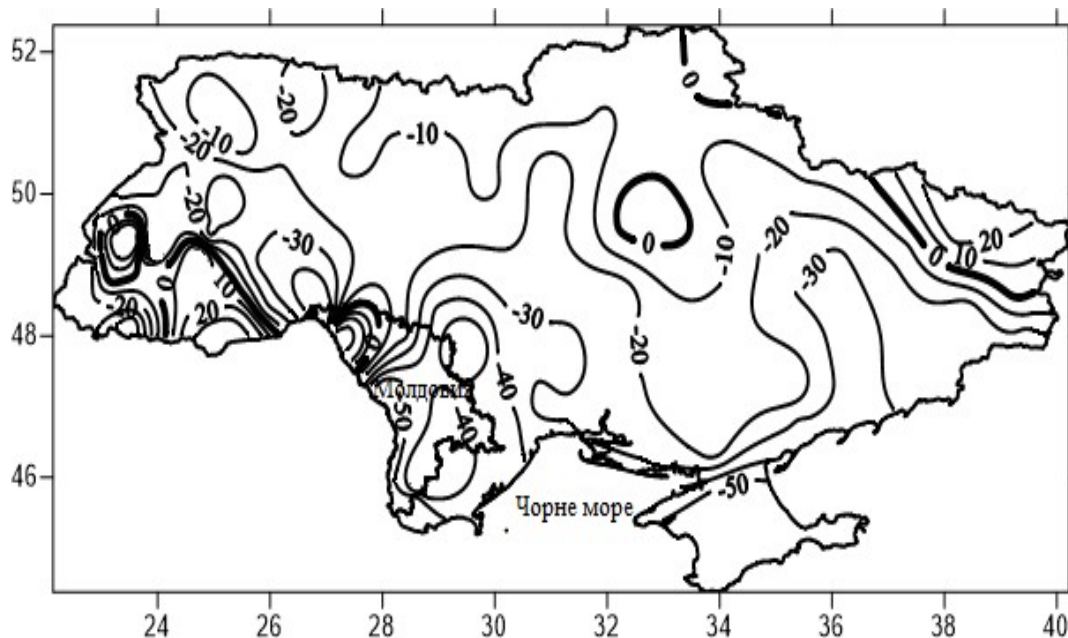


Рисунок 11.4 – Зміни у просторі водних ресурсів (осереднена модельна траєкторія сценарію RCP4.5) для періоду 2021-2050 рр. при порівнянні із базовими даними, отриманими до 1989 р.

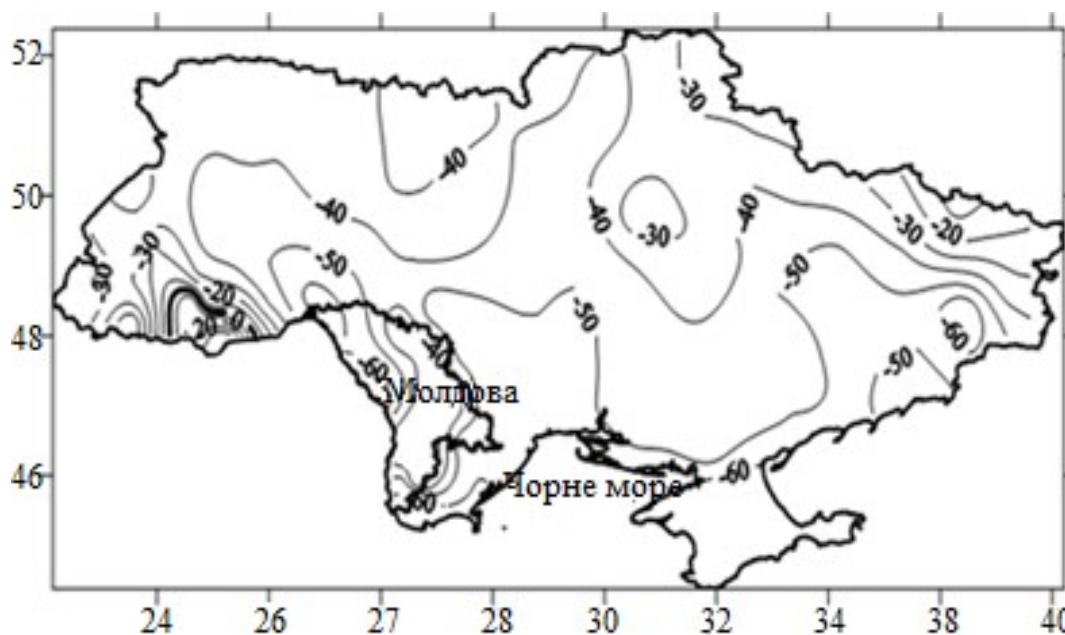


Рисунок 11.5 – Зміни у просторі водних ресурсів (осереднена модельна траєкторія сценарію RCP8.5) для періоду 2021-2050 рр. при порівнянні із базовими даними до 1989 р.

**Контрольні запитання.**

5. На основі якого рівняння виконуються розрахунки середніх багаторічних значень річного кліматичного стоку за метеорологічними даними?
6. Як розраховується коефіцієнт посушливості/зволоженості?
7. Як буде змінюватися положення ізолінії  $\beta_X=0,5$  у майбутньому?
8. Які зміни водних ресурсів очікуються на півдні України за сценарієм RCP4.5 на 2021-2050pp.
9. Які зміни водних ресурсів очікуються на півдні України за сценарієм RCP8.5 на 2021-2050pp.

## **12 УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ В УМОВАХ ЗМІН КЛІМАТУ. ОБГРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ ПО УПРАВЛІННЮ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ НА БАЗІ МОДЕЛІ “КЛІМАТ-СТІК”**

Інтегроване управління водними ресурсами (ІУВР) – це система управління, заснована на обліку всіх видів водних ресурсів (поверхневих, підземних та зворотних вод) у межах географічних кордонів, яка ув'язує інтереси різних галузей та рівні ієрархії водокористування, залучає всі зацікавлені сторони до прийняття рішень, сприяє ефективному використанню водних, земельних та інших природних ресурсів на користь сталого забезпечення вимог природи та суспільства у воді (Хільчевський В.К., 2023). Основи концепції інтегрованого управління водними ресурсами закладалися у деяких країнах Європи та інших континентів на початку ХХ ст. при створенні структур управління водними ресурсами, в першу чергу таких як іспанські водні конфедерації, а пізніше французькі водогосподарські агентства, північноамериканські та канадські іригаційні райони. Після Дублінської конференції щодо водних ресурсів та сталого розвитку (1992 р.) публікації з питань управління водними ресурсами перенасичені використанням терміну «ІУВР» та його різними інтерпретаціями. У розумінні багатьох авторів та ідеологів ІУВР – це процес скоординованого управління та розвитку водних ресурсів, що характеризується зокрема переходом - від управління в межах адміністративних кордонів до управління у межах річкового басейну або іригаційної системи (гідрографічні кордони); - від відомчого управління до інтегрованого міжвідомчого управління; - від одностороннього авторитарного принципу управління "згори вниз" до більш демократичного двостороннього принципу - "знизу вгору" (вимоги на воду та участь водокористувачів в управлінні) та "зверху вниз" (ліміти та підтримка водокористувачів);

Протягом останніх двадцяти-тридцяти років зміни клімату трансформувались в одну з найбільш гострих проблем розвитку людства, що загрожує глобальній економіці та міжнародній безпеці.

Визнанням цього є виокремлення в ухваленому Організацією Об'єднаних Націй (ООН) у 2015 році Порядку денному сталого розвитку на період до 2030 р. спеціальної цілі № 13 щодо зменшення негативного впливу змін клімату.

На глобальному рівні вирішення завдань, пов'язаних зі зміною клімату, регулює Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (1992 р.) та Кіотський протокол до неї (1997 р.) і Паризька угода (2015 р.). Кіотський протокол — міжнародна угода про обмеження викидів в атмосферу парникових газів. Головна мета угоди: стабілізувати рівень концентрації парникових газів в атмосфері на рівні, який не допускав би небезпечного антропогенного впливу на кліматичну систему планети. В Україні



прийнято Концепцію реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року, яка схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 07.12.2016 р. № 932-р.

Згідно Четвертого оціночного звіту Міжурядової групи експертів із зміни клімату (2007 р.), до числа найбільш уразливих до змін клімату віднесено і сектор водних ресурсів. У зв'язку з цим, адаптація до впливу змін клімату на воду (водні об'єкти, водні ресурси, водні екосистеми тощо) є новим викликом для всього людства, зокрема, в контексті водної безпеки, а управління ВЕС має бути ключовим елементом національних стратегій адаптації до змін клімату.

В Україні вже нині спостерігаються окремі прояви впливу глобальних змін клімату на сферу водних ресурсів: зазнає змін водність річок і потужність горизонтів підземних вод, зростає частота та інтенсивність стихійних гідрометеорологічних явищ (паводків, посух), ускладнюється водозабезпеченість господарського комплексу країни у маловодні періоди та роки тощо.

В останні роки за умов поступового потепління клімату спостерігається стійка тенденція до збільшення числа років з посухами. За посушливої погоди та збільшення швидкості вітру до значень, при яких відбувається перенесення часток пилу і піску, виникають пилові бурі, які наносять значні збитки сільському господарству. Тому дослідження змін агрокліматичних показників і адаптація до нових умов земле- та водокористування є актуальним питанням.

З метою зменшення негативного впливу кліматичних трансформацій на водну безпеку держави у майбутньому вже нині потрібно запровадити пом'якшувальні та адаптаційні заходи, основними з яких мають бути наступні:

- визначення вразливості водних ресурсів, територій і галузей економіки до змін клімату;
- нормування національної стратегії та плану адаптації до змін клімату, скоординованих з відповідними стратегіями розвитку секторів економіки та регіональними стратегіями розвитку;
- реалізація заходів Національного плану дій щодо боротьби з деградацією земель та опустелюванням;
- розроблення стратегії економії водних ресурсів України (повторне використання очищених стічних і дощових вод, збільшення обсягів рециркуляції, опріснення морських вод, магазинування поверхневого стоку);
- розроблення та реалізація заходів зі зниження ризику посух і паводків у складі кліматостійких Планів управління річковими басейнами;
- збільшення частки підземних вод у загальному водокористуванні, насамперед, для питних потреб;

– запровадження заходів з природного збереження води, зокрема, відновлення заплав і водно-болотних угідь, лісонасаджень тощо;

– наукові та моніторингові дослідження з вивчення впливу змін клімату на водні ресурси, визначення прийнятних рівнів водних ризиків.

Крім того, у зв'язку кліматичними викликами зростає потреба у розробленні та прийнятті Водної стратегії України, як головного документа щодо формування цілісної та послідовної державної політики у сфері водної безпеки. Дієвим інструментом вирішення стратегічних завдань водної політики та розв'язання нагальних водно-екологічних проблем в умовах нинішніх та очікуваних кліматичних трансформацій має бути інтегроване управління водними ресурсами (ІУВР).

Враховуючи особливу актуальність питань адаптації управління водними ресурсами до змін клімату в Україні, доцільним є використання практичного досвіду і методичних напрацювань зарубіжних фахівців. У даному контексті необхідно відзначити публікації, підготовлені Глобальним водним партнерством, Європейською економічною комісією ООН, Міжнародною мережею басейнових організацій та ін.:

- Керівництво по водних ресурсах та адаптації до змін клімату (2009 р.);
- Керівництво з інтегрованого управління водними ресурсами в транскордонних басейнах річок, озер і водоносних горизонтів (2012 р.);
- Керівний документ до Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС № 24 «Управління басейном річки в умовах змін клімату»;
- Управління водними ресурсами, водогосподарська безпека та адаптація до змін клімату (2009 р.).

**Водна стратегія України до 2050 року покликана розв'язати основні водні проблеми країни, серед них такі.**

- Забезпечення рівного доступу до якісної й безпечної для здоров'я людини питної води.
- Досягнення «доброго» екологічного стану вод.
- Запобігання посухам, паводкам та іншим шкідливим діям вод.
- Стале управління водними ресурсами за басейновим принципом.

Засновані на концепції ІУВР рекомендації є своєрідною «дорожньою картою» по адаптації управління водними ресурсами в умовах змін клімату, яку необхідно пристосувати до специфічних місцевих умов. Для цього пропонуються підходи до оцінювання впливу змін клімату на якість і кількість водних ресурсів, оцінювання ризиків та вразливості, управління пов'язаними з водою ризиками (паводки, посухи, забруднення довкілля) у контексті змін клімату та транскордонного аспекту, рекомендації з врахування кліматичних змін у Планах управління річковими басейнами, адаптування існуючих систем моніторингу, а також покрокові дії з розробки та запровадження стратегії адаптації, насамперед, в транскордонному контексті, з відображенням вигод від адаптаційних заходів тощо. Внаслідок глобальної зміни клімату на фоні погіршення

природного вологозабезпечення та зниження водності річок відбувається погіршення екологічного стану річкових басейнів за одночасного зростання частоти та амплітуди коливань річкового стоку, посилюються ризики проявів руйнівних повеней та паводків. Цілий ряд водно-екологічних проблем та загроз в Україні породжені масштабними заходами з регулювання річкового стоку, що спричиняє деградацію річкових екосистем, погіршення якості води, якісного та кількісного стану біоресурсів на фоні змін клімату. В умовах України проблема нестачі води, насамперед, належної якості, є гострою ще й тому, що вітчизняний господарський комплекс характеризується високою водомісткістю.

Враховуючи досвід Європейського союзу з адаптації до змін клімату, це означає пристосування у природних чи соціальних системах, як відповідь на фактичні або очікувані кліматичні впливи або їхні наслідки, що дозволяє, по-перше, знизити шкоду, та, по-друге, скористатися сприятливими можливостями.

Реформування господарського комплексу в умовах глобального потепління має гарантувати екологічну безпеку населення на основі оцінки наявного та максимально допустимого технологічного навантаження на водозбори річок. Величини цього навантаження в умовах глобального потепління та водогосподарської діяльності визначаються на основі розроблених функцій антропогенного впливу.

За метеорологічними прогнозами траєкторій змін клімату та відповідними оцінками водних ресурсів за моделлю “клімат-стік”, встановлено, що у період 2021-2050 рр. розшириться до півночі степова зона. На базі імітаційного стохастичного моделювання були встановлені критичні (допустимі) значення масштабів водогосподарської діяльності при заданих кліматичних умовах, які інтегрально відображені у значеннях середньої багаторічної величини кліматичного стоку  $\bar{Y}_K$ . Згідно із рекомендаціями ООН масштаби змін водних ресурсів визначаються наступним чином: більше 10% означає існування значущих змін, більше 50% - руйнування, більше 70% - невідновне руйнування. Кількісна оцінка зміни водних ресурсів у моделі “клімат - стік” надається у вигляді коефіцієнтів антропогенного впливу. Наприклад, з таблиці 12.1 можна зробити висновок, що для значення кліматичного стоку  $\bar{Y}_K = 10$  мм значущі зміни водних ресурсів будуть спостерігатися при  $f_B > 0,4\%$  від площі водозбору; при  $f_B > 2,5\%$  - буде відбуватися руйнування водних ресурсів,  $f_B > 5,0\%$  - безповоротне руйнування.

Відповідним чином визначаються критичні масштаби площ зрошування при використанні місцевих водних ресурсів або стоку річок-донорів (табл. 12.2, табл. 12.3).

Таблиця 12.1 – Критичні значення відносних площ водної поверхні, зайнятих штучними водоймами

Характеристика змінювання водних ресурсів	Коефіцієнт антропогенного впливу $K'_{\bar{Y}}$	Середня багаторічна величина кліматичності окоу $\bar{Y}_K$ , мм	Відносна площа водної поверхні $f_B$ , %
значущі зміни водних ресурсів (зменшення більш ніж на 10%)	0,9	5	0,3
		10	0,4
		20	0,6
		30	0,7
		40	0,8
		50	0,9
Руйнування (зменшення більш ніж на 50%)	0,5	5	2,0
		10	2,5
		20	3,5
		30	4,0
		40	5,0
		50	6,0
Невідновне руйнування (зменшення більш ніж на 70%)	0,3	5	3,5
		10	5,0
		20	7,0
		30	8,0
		40	10,0
		50	10,5

Таблиця 12.2 – Критичні значення площ зрошуваних земель при зрошуванні за рахунок місцевих водних ресурсів у степовій зоні ( $v_0 = 0.9$ ;  $\eta = 0.75$ )

Характеристика змінювання водних ресурсів	Коефіцієнт впливу зрошення $k_{\bar{Y}}$	Норма кліматичного стоку $\bar{Y}$ , мм	Відносна площа зрошуваних земель $f_{ЗР}$ , %
значущі зміни водних ресурсів (зменшення більш ніж на 10%)	0,9	10	0,2
		20	0,3
		30	0,5

Кінець табл. 12.2

Руйнування (зменшення більш ніж на 50%)	0,5	10	1,5
		20	2,5
		30	3,5
Невідновне руйнування (зменшення більш ніж на 70%)	0,3	10	2,5
		20	4,0
		30	6,5

Таблиця 12.3 - Критичні значення площ зрошування за рахунок річки-донора (для рівня оптимального зволоження та коефіцієнта корисної дії зрошувальних систем  $\eta = 0,9$ )

Характеристика змінювання водних ресурсів	Коефіцієнт впливу зворотних вод $K_{\bar{Y}}$	Норма кліматичного стоку $\bar{Y}$ , мм	Відносна площа масивів, що зрошуються $f_{Зр}$ , %
значущі зміни водних ресурсів (збільшення більш ніж на 10%)	1,1	10	7
		20	10
		30	13
руйнування (збільшення більш ніж на 50%)	1,5	10	15
		20	30
		30	45
невідновне руйнування (збільшення більш ніж на 70%)	1,7	10	19
		20	40
		30	63

При наявності на водозборі різних чинників водогосподарської діяльності допустимі масштаби водогосподарських перетворень визначаються з використанням коефіцієнтів сумарного антропогенного впливу за розробленою методикою.

$$\delta_{\%} = \frac{\bar{Y}_{ПОБ} - \bar{Y}_{ПР}}{\bar{Y}_{ПР}} 100\% \quad (12.4)$$

Показниками впливу штучних водойм через втрати на їх заповнення слугують коефіцієнт акумуляції та поняття про вільний стік. Коефіцієнт акумуляції розраховується як відношення об'єму штучних водойм до об'єму води, який протікає через створ річки, тобто до середнього багаторічного значення річного стоку

$$k_{AK} = \frac{\bar{W}_{ЗАП}}{\bar{W}_{РІЧКИ}}, \quad (12.1)$$

$\bar{W}_{ЗАП}$  - об'єм заповнення штучних водойм;

$\bar{W}_{РІЧКИ}$  - об'єм стоку у створі річки;

$k_{AK}$  - коефіцієнт акумуляції.

Вільний стік являє собою різницю між середнім багаторічним стоком  $\bar{W}_{РІЧКИ}$  та об'ємом заповнення штучних водойм  $\bar{W}_{ЗАП}$ . Вільний стік має забезпечувати наповнення водойми-приймача (наприклад, лиману, в який впадає річка).

Коефіцієнт антропогенного впливу, який характеризує втрати стоку на заповнення штучних водойм водою, визначається таким чином

$$\frac{\bar{W}_{ПР} - \bar{W}_{ЗАП}}{\bar{W}_{ПР}} = \frac{\bar{W}_{ПОБ}}{\bar{W}_{ПР}} = k_{\bar{Y},3}, \quad (12.2)$$

$$\bar{W}_{ПОБ} = \bar{W}_{ПР} - \bar{W}_{ЗАП}, \quad (12.3)$$

де  $\bar{W}_{ПОБ}$  - об'єм побутового стоку, який у даному випадку є характеристикою вільного стоку;

$\bar{W}_{ПР}$  - об'єм природного стоку, який надходить до водосховищ або ставків з річки;

$\bar{W}_{ЗАП}$  - об'єм заповнення штучних водойм;

$k_{\bar{Y},3}$  - коефіцієнт втрат стоку на заповнення штучних водойм.

Зміни середнього багаторічного стоку оцінюються за рівнянням

З метою визначення втрат стоку річки при заповненні штучних водойм на базі імітаційного моделювання можна надавати для заданих кліматичних умов кількісні оцінки наслідків будівництва ставків та водосховищ зміни природного стоку, коефіцієнти акумуляції, значення вільного стоку річки (табл.12.4), що дозволяє оцінити перспективи подальшої життєдіяльності водної екосистеми.

Таблиця 12.4 – Результати імітаційного моделювання з метою виявлення допустимих об'ємів заповнення штучних водойм річки. Середня багаторічна величина річного стоку для річки Хаджидер в заданих кліматичних умовах становить 6мм або 5,36 млн.м<sup>3</sup>

Середній багаторічний об'єм заповнення штучних водойм, млн.м <sup>3</sup>	Коефіцієнт акумуляції $k_{AK} = \frac{\bar{W}_{ЗАП}}{\bar{W}_{РІЧКИ}}$	Вільний стік, млн.м <sup>3</sup>	Коефіцієнт антропогенного впливу $k_{\bar{V},ЗАП}$	Зміни стоку за рахунок наповнення штучних водойм, %
0,5	0,0933	4,86	0,907	-9,33
1	0,186	4,36	0,813	-18,7
2	0,373	3,36	0,627	-37,3
3	0,56	2,36	0,440	-56,0
4	0,75	1,36	0,253	-74,6
5	0,93	0,36	0,067	-93,3
6	1,12	0,00 <b>немає</b>	0,00	-100

З таблиці 12.4 витікає, що коли об'єм заповнення штучних водойм перевищує об'єм стоку річки, то вільний стік досягає нуля, тобто річка пересихає. При сумарному об'ємі заповнення, рівному 1 млн.м<sup>3</sup>, зменшення водних ресурсів перевищило 10% , тобто зміни стали статистично значущими. При заповненні, рівному 3 млн.м<sup>3</sup> , зменшення водних ресурсів перевищило 50% , що означає руйнування водних ресурсів. Щоб зміни стоку були незначущими об'єм заповнення штучних водойм не має перевищувати 0,5 млн.м<sup>3</sup>.

Збереження водності річок передбачає проведення таких заходів. Необхідна інспекція існуючих штучних водойм та виведення із дії тих ставків і водосховищ, які здійснюють тільки сезонне регулювання стоку, мають малі глибини при значній площі водної поверхні. Такі штучні водойми в умовах глобального потепління виступають у ролі великих випарників, що сприяють значному зменшенню водних ресурсів.

При зрошуванні сільськогосподарських угідь за рахунок місцевих водних ресурсів рекомендовано використовувати воду штучних водойм, які здійснюють не сезонне, а багаторічне регулювання стоку, наповнюючись, переважно, у багатоводні роки.

Зменшення втрат поверхневих водних ресурсів досягається також завдяки використанню переважно зернових та інших засухостійких культур, які потребують меншої кількості води для свого оптимального розвитку.

Збільшення коефіцієнту корисної дії зрошувальних систем в результаті їх модернізації має забезпечити зменшення втрат водних ресурсів в процесі транспортування води з русел річок до сільськогосподарських масивів.

При зрошуванні сільськогосподарських угідь водами річок-донорів при низьких коефіцієнтах корисної дії зрошувальних систем зростає об'єм зворотних вод і відбувається часткова компенсація водних ресурсів тих водозборів, які увійшли до складу зрошувальної мережі. Проте, надходження забруднених вод через річки-колектори до водоприймачів, значно погіршує екологічний стан останніх.

Забезпечення населення водою необхідно здійснювати з резервуарів підземних вод та за рахунок стоку великих річок, сумарна водність яких значно менше підлягає впливу змін клімату ніж водність малих та середніх річок степової та лісостепової зон України. Відновленню та модернізації необхідно піддати вже існуючі зрошувально-осушувальні системи та розглянути можливість побудови нових, оскільки саме ці системи будуть здійснювати перекид стоку великих річок до посушливих зон України, границя проходження яких буде підніматися у північному напрямі.

### **Контрольні запитання.**

- 1 Що таке інтегроване управління водними ресурсами?
- 2 Що є головною метою міжнародних кліматичних угод?
- 3 Задачі водної стратегії України до 2050 року.
- 4 Використання антропогенних функцій до визначення критичних масштабів водогосподарської діяльності.



## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С., Овчарук В.А. Гідрологічні розрахунки. Одеса: ТЕС, 2014. 483 с.
2. Лобода Н.С., Гопченко Є.Д. Стохастичні моделі у гідрологічних розрахунках. - Навчальний посібник. Одеса: Екологія, 2006. 200 с.
3. Лобода Н.С. Методи статистичного аналізу у гідрологічних розрахунках і прогнозах. Навчальний посібник. – Одеса: Екологія. 2010. 184 с.
4. Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України. – Одеса.: Екологія. 2011. 696 с.
5. Степаненко С.М., Польовий А.М., Лобода Н.С. та ін. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України / За ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. –Одеса: “ТЕС”, 2015. – 520 с.
6. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату: колективна монографія / за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового; Одеський державний екологічний університет. Одеса: ТЕС, 2018. – 548 с.
7. Комплекс лекцій, завантажений з системи Moodle, доступний за посиланням <http://dpt06s.odku.edu.ua/course/view.php?id=30>
8. Шищенко Н.Г., Гавриленко О.П. Прикладна геоекологія: підручник. Київ: ПВТП «LAT&K», 2020. 440 с.
9. Хільчевський В.К., Гребінь В.В., Манукало В.О. Гідрологічний словник. Київ: ДІА, 2022. 238 с.

### Додаткова

10. Лобода Н.С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния: Монография. – Одесса: Экология, 2005. – 208 с.
11. Лобода Н.С., Божок Ю.В. Оцінка змін водних ресурсів р. Дунай у ХХІ сторіччі за сценарієм А1В з використанням моделі “клімат-стік”// Український гідрометеорологічний журнал. Одеса, ТЕС, №18, 2016. – С.112- 120.
12. Лобода Н.С., Тучковенко Ю.С., Гриб О.М., Кушнір Д.В. Обґрунтування ефективності заходів по відновленню стоку річки Великий Куяльник з метою стабілізації гідрологічного режиму Куяльницького лиману на початку ХХІ сторіччя // Розділ колективної монографії Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології. – Київ: Ніка-Центр, 2019. -330 с.
13. Лобода Н. С., Козлов, М. О. *Оцінка водних ресурсів річок України за середніми статистичними моделями траєкторій змін клімату RCP4.5 та RCP8.5 у період 2021-2050 роки.* // Український

- гідрометеорологічний журнал, 2020. №25. с. 93-104. ISSN 2311-0902, 2616-7271. – С.93 – 104.
14. Мельник С. В, Лобода Н.С. Динамика наносов верхнего и среднего Днестра в условиях антропогенной нагрузки и изменения климата. Монография. / Одесский государственный экологический университет. / Одесса: ТЕС, 2019. – 296 с.
  15. Овчарук, В. А. *Максимальний стік весняного водопілля рівнинних річок України: монографія. Авторська. Одеський державний екологічний університет, 2020. 300с.*
  16. Тучковенко Ю. С., Хохлов В. М., Лобода Н. С., Кушнір Д. В., Серга Е. М. Вплив змін клімату на гідрологічний і гідроекологічний режими лиманів північно-західного Причорномор'я : монографія / за ред. Ю. С. Тучковенко. Одеса : Одеський державний екологічний університет, 2022. 202 с. ISBN 978-966-186-227-1. URL: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/10929/>
  17. Sukhodolov A. N., Loboda N.S., Katolikov V.M., Arnaut N.A. and others. Chapter 13. Western Steppic Rivers // Rivers of Europe. Edited by Klement Tockner, Christopher T. Robinson, Urs Uehlinger, Academic Press is an imprint of Elsevier, 2009. – P.497-524.

Навчальне електронне видання

ЛОБОДА Наталія Степанівна  
ОТЧЕНАШ Наталія Дмитрівна

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ГАЛУЗІ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ  
(ВОДНЕ ГОСПОДАРСТВО)

Конспект лекцій

**Видавець і виготовлювач**

Одеський державний екологічний університет

вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016

тел./факс: (0482) 32-67-35

E-mail: [info@odeku.edu.ua](mailto:info@odeku.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 5242 від 08.11.2016