

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЛОБОДА Н. С.

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ГАЛУЗІ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ
(ВОДНЕ ГОСПОДАРСТВО)

Конспект лекцій

Одеса
Одеський державний екологічний університет
2020

УДК 556.261.“45”.18

Л68

Рекомендовано методичною радою Одеського державного екологічного університету
Міністерства освіти і науки України як конспект лекцій (протокол № 8 від 28.05.2015 р.)

Лобода Н.С.

Вплив кліматичних змін на галузі економіки України (водне господарство): конспект лекцій. Одеса, ОДЕКУ, 2015. 63 с.

Конспект лекцій призначений для навчання студентів за спеціальністю “Гідрологія та гідрохімія”, напрям підготовки “Гідрометеорологія”. 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 ХХІ сторіччя та у майбутньому (за сценаріями глобального потепління).

ISBN 978-966-186-011-6

© Лобода Н.С. 2015
© Одеський державний екологічний університет, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. Зміни кліматичних чинників формування стоку та поверхневих водних ресурсів України на початку XXI сторіччя.....	5
РОЗДІЛ 2. Сучасні підходи до оцінки наслідків кліматичних змін у водному господарстві.....	9
РОЗДІЛ 3. Теоретичні основи моделі “клімат-стік” при визначенні природних водних ресурсів.....	14
3.1 Рівняння водно-теплогового балансу.....	14
3.2 Визначення статистичних параметрів природного річного стоку України за моделлю “клімат-стік”.....	19
РОЗДІЛ 4. Стохастичні моделі річного стоку.....	22
РОЗДІЛ 5. Імітаційне стохастичне моделювання побутового річного стоку.....	28
РОЗДІЛ 6. Теоретичні основи моделювання водних ресурсів за сценаріями глобального потепління на основі моделі “клімат-стік”.....	34
РОЗДІЛ 7. Оцінка змін водних ресурсів України за сценарієм глобального потепління А1В.....	39
РОЗДІЛ 8. Оцінка змін водних ресурсів України за сценарієм глобального потепління А2.....	48
РОЗДІЛ 9. Оцінка водних ресурсів річок водозбору Тилігульського лиману за даними сценарію А1В на основі моделі “клімат-стік”.....	54
ЛІТЕРАТУРА.....	60
ТЕРМІНИ.....	61

ВСТУП

Водні ресурси визначають стан навколишнього середовища, вони пов'язані із соціальним станом суспільства і здоров'ям людини. Використання водних ресурсів в Україні є одним з найбільш високих у світі й досягає майже 100 % техногенного перетворення поверхневих вод й до 10–20 % підземних. Зміни глобального клімату, які спостерігаються протягом 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 водних ресурсів та окремі складові водогосподарських балансів, які пов'язані із коливаннями клімату (випаровування з водної поверхні штучних водойм, показники дефіциту споживання води рослинами, надмірного 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 [12]).

Гідрологічна вивченість водних ресурсів України недостатня для прийняття науково обґрунтованих рішень щодо експлуатації та управління водогосподарськими системами. Тому перед сучасними науковцями стоїть проблема розробки 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 зумовлена необхідністю визначення вразливості водних екосистем до змін клімату та оцінки можливого стану водних ресурсів України при глобальному потеплінні.

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

Теоретичним базисом імітаційного моделювання є модель “клімат-стік”, розроблена в Одеському державному екологічному університеті. Модель дозволяє виконувати оцінку стану водних ресурсів за метеорологічними характеристиками, включаючи дані кліматичних сценаріїв змін глобального клімату.

РОЗДІЛ 1
**ЗМІНИ КЛІМАТИЧНИХ ЧИННИКІВ ФОРМУВАННЯ СТОКУ
ТА ПОВЕРХНЕВИХ ВОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ НА ПОЧАТКУ
XXI СТОРІЧЧЯ**

Аналіз різницевих інтегральних кривих річних сум опадів, побудованих за даними спостережень із значною тривалістю (близько 100 років) на метеостанціях України, підтвердив існування асинхронності у коливаннях опадів західної та східної частин України. На території східної (Лівобережної) частини України суха або негативна фаза коливань сум річних опадів спостерігалася з 30-х років XX сторіччя до 1964 року, після чого відбувся перехід до позитивної або зволоженої фази, яка тривала до початку XXI сторіччя. Для території західної (Правобережної) частини України також була характерна наявність сухої фази у коливаннях річних опадів, яка продовжувалася до 1964 року. З 1965 року почалася позитивна або зволожена фаза коливань опадів, яка у 1982 році змінилася на від'ємну і тривала до початку XXI сторіччя із незначним “сплеском” у 90-ті роки.

У коливаннях середніх за рік температур повітря західної та східної частин України також існувала певна відмінність. Холодна (від'ємна) фаза у ході середніх річних температур на території західної частини України спостерігалася з початку 50-х і до кінця 80-х років XX сторіччя, а на території східної – з кінця XIX сторіччя до 1933 року. Таким чином, тепла або додатна фаза коливань річних температур повітря установилася на території Лівобережної України набагато раніше, ніж на території Правобережної України. Можна зазначити, що з кінця 80-х років минулого сторіччя коливання річних температур повітря стають синфазними у межах усієї України. Одержані висновки підтверджуються результатами факторного аналізу, застосованого до полів опадів і температур повітря. Дослідження статистичної структури полів середньої річної температури повітря, а також середніх температур повітря теплого та холодного періодів року за період з 1981 по 2002 рр. , виконані на основі факторного аналізу, показали, що кожне поле температур можна описати лише одним фактором, внесок якого перевищує 80%. Тобто, можна зробити висновок, що температурний режим України визначається єдиним для усієї території процесом.

Статистична структура сум опадів за рік та опадів теплого періоду описується двома факторами, внесок яких у дисперсію вхідних даних перевищує 60%. Отже вони знаходяться під впливом двох процесів. Зміна знака факторних навантажень на другий фактор при переході від Східної України до Західної свідчить, що на режим формування опадів теплого періоду та року впливають різні за своєю природою атмосферні процеси,

які зумовлюють різницю у характері коливань опадів цих територій. Структуру поля сум опадів холодного періоду можна представити лише одним фактором.

У період з 1981-2002 рр. виявлено значущий статистичний зв'язок між індексами Північно-Атлантичного коливання (ПАК) та температурами повітря: коефіцієнти кореляції змінюються від 0,80 до 0,40 (табл. 1.1). Вплив ПАК на температуру повітря найбільшою мірою проявляється у зимовий та весняний сезони й зумовлює зміни у термічному режимі річок під час утворення льодових явищ. Що стосується опадів, то тісні лінійні зв'язки із індексом ПАК установлені тільки за даними про температуру на метеостанціях західної частини України. Слід зазначити, що у попередній період (до 1981 р.) тісних зв'язків індексів ПАК із метеорологічними характеристиками не виявлено.

Таблиця 1.1 - Коефіцієнти кореляції між індексами ПАК, опадами (Х) і температурами повітря (Т) за період спостережень після 1980 р.

Метеостанції	Характеристика	Рік	Зима (XII-II)	Весна (III-V)	Літо (VI-VIII)	Осінь (IX-XI)
Житомир	Х	0,19	0,03	0,18	0,21	0,22
	Т	0,64	0,75	0,67	0,00	0,50
Умань	Х	0,26	0,06	0,12	0,10	0,18
	Т	0,59	0,59	0,54	0,00	0,27
Київ	Х	0,47	0,14	0,29	0,18	0,43
	Т	0,59	0,60	0,52	0,00	0,43
Кам'янець-Подільський	Х	0,54	0,21	0,36	0,23	0,60
	Т	0,80	0,53	0,56	0,04	0,49
Тернопіль	Х	0,75	0,43	0,36	0,57	0,61
	Т	0,79	0,70	0,61	0,10	0,58
Луганськ	Х	0,34	0,15	0,19	0,23	0,39
	Т	0,40	0,47	0,48	0,11	0,01
Харків	Х	0,41	0,20	0,00	0,21	0,28
	Т	0,47	0,51	0,51	0,08	0,19

До аналізу ролі різних атмосферних процесів у формуванні водних ресурсів України залучалися поля річного стоку у межах України та на прилеглих територіях з використанням методу головних компонент. До розгляду увійшли дані по таких водозборах: р. Дніпро – м. Речиця (Білорусія); р. Сож – м. Гомель (Білорусія); р. Десна – м. Чернігів (Україна); р. Прип'ять – м. Мозир (Білорусія); р. Дунай – м. Рені (Україна); р. Дністер – с. Заліщики (Україна); р. Південний Буг – с. Олександрівка

(Україна); р. Дунай – м. Братислава (Словаччина); р. Тиса – р. Польша (Угорщина); р. Мюреш – м. Арад (Румунія); р. Сан – м. Радомишль (Польща); р. Західний Буг – м. Вишків (Польща); р. Дон – ст. Раздорська (Росія), р. Німан – р. Смалінінкай (Литва); р. Рейн – м. Кельн (Німеччина); р. Вісла – м. Тзеу (Польща); р. Одер – м. Гоздовіце (Польща). Розкладанню за природними ортогональними функціями були піддані кореляційні та коваріаційні матриці річного стоку, за якими визначалися закономірності просторового та часового розподілу річного стоку. Результати розкладання у вигляді базисних та амплітудних функцій розглядалися у зв'язку із певними показниками атмосферних процесів, що впливають на умови формування стоку річок Європи.

Внесок перших трьох головних компонент в опис загальної дисперсії початкових даних склав 48%, 20% та 11% відповідно для першої, другої й третьої компонент. Їхній сумарний внесок перевищує 70%, що є достатнім для опису цих полів річного стоку. Встановлено статистично значущий зв'язок між другою амплітудною функцією (часовою складовою розкладання) та індексами ПАК, а також між третьою амплітудною функцією та індексами Скандинавського коливання. Тіснота лінійних зв'язків характеризується коефіцієнтами кореляції, що дорівнюють 0,3-0,4. Просторовий розподіл вагових коефіцієнтів другої компоненти дозволив обґрунтувати виділення за закономірностями коливань річного стоку України її східної та західної частин. Просторовий розподіл вагових коефіцієнтів третьої компоненти показав на існування відмінностей в коливаннях річного стоку річок за географічною широтою, при цьому виділяються північна та південна частини України. Одержані результати підтверджують вище визначений висновок щодо значного впливу Північно-Атлантичного коливання на формування річного стоку західної частини України та вплив Скандинавського коливання на формування стоку північної частини України.

Дослідження характеристик стоку в різні фази водного режиму річок України дозволили встановити, що в останні десятиріччя відбуваються значні зміни характеристик максимального і мінімального стоку: максимальний стік зменшується, а мінімальний зростає (табл.1.2).

Такий перерозподіл стоку в межах року відбувається через збільшення температур повітря холодного періоду, що спричиняє зростання кількості та тривалості відлиг, зменшення глибини промерзання ґрунту, збільшення втрат талих вод на їхню фільтрацію у водоносні горизонти, зменшення запасів води, накопичених у сніговому покриві перед початком весняного водопілля. Внаслідок цих процесів поверхневий стік у період весняної повені зменшується, а запаси підземних вод, і відповідно й стік літньо-осінньої межени зростають.

Таблиця 1.2 - Зміни характеристик водності у створі р.Сіверський Донець – м. Зміїв (лісостепова зона, Середньоруська провінція)

Період осереднення	Характеристики стоку, осереднені по різних періодах багаторічних спостережень			
	$q_{рік},$ дм ³ /(с·км ²)	$Y_{рік},$ мм	$q_{max},$ дм ³ /(с·км ²)	$q_{min},$ дм ³ /(с·км ²)
1923-1962	2,70	85	4,9	0,3
1963-1970	2,72	86	4,7	0,4
1971-1975	2,64	83	4,4	0,4
1976-1980	2,71	86	4,3	0,5
1981-1985	3,46	109	2,1	1,4
1986-1990	2,84	90	2,2	1,4
1991-1995	2,54	80	1,4	1,3
1996-2000	3,00	94	1,3	1,6
2001-2005	2,55	80	0,8	1,5

Одержані результати підтверджуються дослідями В.І. Вишневецького, Н.С. Лободи та В.С. Мельника, висновками праць науковців Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту, Одеського державного екологічного університету.

Виявлено, що за останні два десятиріччя зросла тривалість бездошових періодів у степовій зоні України. Аналіз індексів метеорологічних посух SPEI показав, що після 1989 року кількість та тривалість інтенсивних посух збільшилася. Тривалі бездошові періоди та формування метеорологічних посух спричиняють гідрологічну посуху, яка супроводжується зменшенням стоку річок у період літньо-осінньої межени, тривалим пересиханням та неспроможністю наповнити значну кількість ставків та водосховищ.

Контрольні запитання

1. Як змінюються характеристики максимального стоку на початку XXI сторіччя?
2. Як впливають зміни глобального клімату на мінімальний стік річок України?
3. Які великомасштабні атмосферні процеси зумовлюють закономірності коливань річного стоку в Україні?
4. Наведіть свідчення зростання посушливості клімату у сучасних умовах.

РОЗДІЛ 2

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ НАСЛІДКІВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН У ВОДНОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Установлено, що впродовж останніх двадцяти років середня річна температура повітря у межах рівнинної частини України зросла на $0,8^{\circ}\text{C}$. Найбільший внесок у зміну річної температури повітря належить зимовому та весняному сезонам. При несуттєвих змінах річних опадів (у межах 10%) відбувся перерозподіл їх сезонних та місячних значень. Кількість опадів зросла в усі сезони (крім зимового), а найбільше – у перехідні сезони (навесні та восени). Зміна ресурсів тепла й вологи зумовила зменшення снігового та збільшення підземного живлення річок. Частка весняного водопілля у внутрішньорічному розподілі стоку річок зменшилася з 42-53% до 35-37%. За період 1989-2008 рр. зростання річних витрат стоку відбулося у Дніпровсько-Сіверськодонецькій (+22%), Прут-Дністровській (+9%), Бузько-Дністровській (+5%), Деснянській (+1%) ландшафтно-гідрологічних провінціях. Зменшення річних витрат за цей же період встановлено для Лівобережно-Дніпровської (-11%), Причорноморсько-Приазовської (-8%), Нижньобузько-Дніпровської (-4%), Дністровсько-Дніпровської провінцій (-4%). Для окремих річок Причорноморсько-Приазовської провінції зменшення річного стоку за період 1989-2008 рр. досягло 40% [3]. Згідно із дослідженнями В.В. Гребіня роком початку статистично значущих змін клімату в Україні слід вважати 1989р.

Оскільки наявність змін у водному та льодовому режимі річок при сучасних змінах регіонального клімату є встановленою, постає питання про прогнозування стану поверхневих водних ресурсів України на основі кліматичних сценаріїв. Такого роду прогнози можуть надаватись за допомогою математичних моделей, які враховують зв'язки між кліматичними чинниками та характеристиками водності річок.

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 щодо коливання водності, тобто відбувається прогноз змін водних ресурсів за виявленою тенденцією. Згідно із другою стратегією, дані кліматичних сценаріїв використовуються у моделях формування стоку.

Прикладом першої стратегії є введення поправок та поправкових коефіцієнтів, які відображають вплив змін клімату на стік, в існуючі розрахункові формули стоку. При дослідженнях характеристик максимального стоку та чинників їх формування для річок Лівобережного Дніпра (рр. Сейм, Десна, Псел, Ворскла) Ж.Р. Шакірзановою виявлені статистично значущі спадні тренди у коливаннях максимальних глибин промерзання ґрунту, максимальних запасів води у сніговому покриві,

шарів стоку весняного водопілля та максимальних витрат води. Виявлено, що дати початку весняного водопілля зсуваються з кінця березня (30-ті роки минулого сторіччя) на середину лютого (початок XXI сторіччя). При цьому у багаторічних коливаннях середніх місячних температур повітря відзначається додатний тренд (1945-2010 рр.). Для врахування наслідків кліматичних змін рекомендовані спеціальні поправкові коефіцієнти, які відображають зміни водності весняного водопілля при глобальному потеплінні. Останні рекомендується вводити до середніх багаторічних величин шарів стоку та максимальних витрат води, які є базовими характеристиками у методі територіальних довгострокових прогнозів.

Згідно із другою стратегією, до оцінок змін характеристик стоку залучаються математичні моделі, на вході яких використовується метеорологічна інформація. Саме такі моделі придатні для розрахунків і прогнозів змін водних ресурсів за даними сценаріїв глобального потепління. Певну проблему використання сучасних математичних моделей формування стоку становить недостатня роздільна здатність моделей. Моделі загальної циркуляції атмосфери та океану, які в більшості своїх реалізацій мають роздільну здатність $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$, не можуть використовуватись для досліджень регіональних особливостей кліматичних змін в Україні, оскільки у такому випадку на її територію припадає приблизно 15 вузлів координатної сітки. У зв'язку з цим перші роботи з оцінки характеристик стоку виконувалися для різних географічних зон України [13]. В Одеському державному екологічному університеті для оцінки змін водних ресурсів в умовах глобального потепління застосовувались сценарії ВМО, відомі як сценарії “раптового” або “одночасного” подвоєння концентрації CO_2 в атмосфері: сценарій GISS – модель інституту Годдара з космічних досліджень, у якій чутливість до подвоєння CO_2 становить $4,2^{\circ}C$; сценарій GFDL – модель Лабораторії геофізичної гідродинаміки США, у якій чутливість до подвоєння CO_2 становить $4,0^{\circ}C$; CCCM – модель Канадського кліматичного центру, у якій чутливість до подвоєння CO_2 становить $3,5^{\circ}C$; UKMO – модель Метеорологічного бюро Об'єднаного королівства, у якій чутливість до подвоєння CO_2 становить також $3,5^{\circ}C$. Більш реалістичними вважались сценарії, в яких підвищення концентрації CO_2 розглядалось поступово. Серед таких моделей використовувались сценарії GFDL, побудовані за моделлю Лабораторії геофізичної динаміки США та MPI (модель інституту Макса Планка, Німеччина). Оцінки можливих змін водних ресурсів в результаті глобального потепління надавались по географічних зонах та для водозборів великих річок. Сучасні моделі прогнозу погоди та клімату мають роздільну здатність на порядок вищу,

тобто горизонтальні кроки сітки для розрахунків із задовільною точністю становлять 20-50 км.

Серед сучасних гідрологічних моделей стоку, в яких можна використовувати метеорологічні дані сценаріїв глобального потепління, є моделі із розподіленими параметрами. У цих моделях окрім метеорологічних даних розглядаються характеристики підстильної поверхні на водозборі. На виході таких моделей визначаються ряди поверхневого та підземного стоку, показники якості вод. Основними вхідними даними є матеріали по дощових опадах або запасах води у сніговому покриві. Європейська гідрологічна система є прикладом гідродинамічної моделі з розподіленими параметрами. Вона являє собою систему диференціальних рівнянь, представлених у частинних похідних, які описують гідрологічні процеси у межах басейну.

Впродовж 2012-2014 рр. в Одеському державному екологічному університеті (ОДЕКУ) виконувалась науково-дослідна робота, в якій об'єктом досліджень став Тилігульський лиман: проект 7-ї 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, яка описує взаємодію води й підстильної поверхні, вона 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 км² до 200000 км². 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 трірівневу 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 процеси агрегуються на рівні суббасейну, 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. SWIM застосовувалась до водозборів різних розмірів, по-перше в Німеччині, а потім і в інших європейських країнах, а також для річкових басейнів в Африці, Азії і Південній Америці.

Недоліком розподілених та напів-розподілених моделей є вимога до значної густоти розташування кліматичних станцій: наприклад, для SWIM – не менш, ніж одна станція на 100 км². В країнах з малою кількістю кліматичних (метеорологічних) станцій застосування таких моделей може призвести до значних похибок у розрахунках.

Найчастіше при оцінці впливу змін клімату на водні ресурси територій із не густою мережею гідрометеорологічних спостережень використовуються балансові моделі, а саме моделі водного та водно-теплого балансу. В останніх 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 опису випаровування у рівнянні водного балансу.

У Одеському державному екологічному університеті протягом останніх десятиріч для оцінки водних ресурсів України за метеорологічними даними використовується модель “клімат-стік”, розроблена під керівництвом проф. Є.Д. Гопченка та проф. Н.С. Лободи [4]. Розробка такої моделі була актуальною в другій половині ХХ сторіччя через нестачу даних спостережень за стоком як у природних, так і в 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. Методики розрахунків природного (непорушеного водогосподарською діяльністю) стоку та побутового річного стоку при відсутності даних гідрологічних спостережень, визначені в результаті застосування моделі “клімат-стік”, увійшли до нової редакції нормативних документів ДБН В.2.4-Х:201Х “Визначення розрахункових гідрологічних характеристик” України та ДБН “Определение гидрологических характеристик для условий республики Молдова. СР D.01.05-2012” .

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть прогнозу змін водності за виявленою тенденцією?
2. Описати схему розрахунків за поділом об'єктів дослідження з використанням моделі SWIM.
3. Як можна застосовувати складові теплового балансу при розрахунках стоку за моделлю водного балансу?

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛІ “КЛІМАТ-СТІК” ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПРИРОДНИХ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

Модель “клімат-стік”, розроблена в Одеському державному екологічному університеті, складається з двох частин. Перша частина дозволяє виконувати оцінку *природного* (непорушеного водогосподарською діяльністю) річного стоку на основі метеорологічних даних, друга – оцінку *побутового* (перетвореного водогосподарською діяльністю) стоку. На вході у першу частину моделі використовуються метеорологічні дані, у другу – природний (непорушений водогосподарською діяльністю) річний стік та кількісні показники водогосподарських перетворень. Математичною базою першої частини є рівняння водно-теплогового балансу водозбору, другої – рівняння водогосподарського балансу водозбору, представлене у стохастичній (ймовірнісній) формі. Розглядається ланцюг послідовностей формування стоку: «клімат → кліматичний стік → підстильна поверхня → природний стік → водогосподарські перетворення → побутовий стік». Таким чином, вивчається та моделюється робота водогосподарської системи, яка підлягає зовнішнім (кліматичним) та внутрішнім (водогосподарським) впливам й певним чином реагує на цей вплив. У моделі використовується поняття «кліматичний стік», тобто стік, зумовлений кліматичними чинниками й розрахований за метеорологічними даними.

3.1 Рівняння водно-теплогового балансу

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

$$\bar{X} = \bar{E} + \bar{Y} , \quad (3.1)$$

де \bar{X} , \bar{E} , \bar{Y} – річні норми опадів, випаровування з поверхні суші та стоку відповідно.

У випадку оцінки норми річного стоку на основі рівняння водного балансу проблема гідрологічних розрахунків зводиться до визначення норми випаровування з поверхні суші, яке розраховується з великими похибками

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E} . \quad (3.2)$$

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 обумовила потребу розглядати задачу визначення елементів водного балансу разом з теплоенергетичним балансом земної поверхні. Перспективи сумісного вирішення водного та теплоенергетичного балансів поверхні суші розглядалися багатьма авторами (Е.М. Ольдекоп, 1911, М.А. Веліканов, 1928, М.І. Будико, 1958). Як найбільш оптимальний, був визнаний підхід, запропонований В.С.Мезенцевим. Процес теплообміну в будь-якій точці простору і за будь-який проміжок часу представлений ним у вигляді статей приходу й витрат енергії

Перша (кліматична) частина моделі базується на рівнянні водно-теплового балансу ділянки суші у модифікації В.С. Мезенцева [10], диференціальна форма якого записується наступним чином

$$\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} + \frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = 1, \quad (3.3)$$

де H - характеристика ресурсів зволоження, під якою розуміють опади X , що випадають за розрахунковий період, та зміни $w_1 - w_2$ запасів вологи в ґрунті, тобто $H = X + w_1 - w_2$; $\beta_E, \beta_H, \beta_Y$ - складові рівняння водного балансу представлені у відносних одиницях.

Величини $\beta_E, \beta_H, \beta_Y$ представляють собою відношення складових рівняння водного балансу до характеристики теплоенергетичних ресурсів клімату E_m

$$\beta_H = \frac{H}{E_m}; \beta_E = \frac{E}{E_m}; \beta_Y = \frac{Y}{E_m} \quad (3.4)$$

де E - випаровування з поверхні суші; Y - стік води.

Використовуючи позначення (3.2) та рівняння водного балансу водозбору $Y = H - E$, останнє можна записати наступним чином

$$\beta_Y = \beta_H - \beta_E. \quad (3.5)$$

Складові рівняння (3.3) підлягають таким граничним умовам

$$0 \leq \beta_E \leq 1 \text{ при } 0 \leq \beta_H \leq \infty \text{ та } 0 \leq \beta_Y \leq \beta_H \leq \infty. \quad (3.6)$$

Частинні похідні $\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H}$ та $\frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H}$ представляються через допоміжні функції, які характеризують співвідношення вологи та тепла, що визначають нестачу насичення приземного повітря вологою:

$$\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} = (1 - \beta_E^n)^{\frac{n+1}{n}}, \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = 1 - (1 - \beta_H^n)^{\frac{n+1}{n}}, \quad (3.8)$$

де n – параметр, який інтегрує фізико-географічні умови формування стоку.

Після інтегрування та перетворень було отримане наступне рішення

$$\beta_Y = \beta_H - (1 - \beta_H^n)^{\frac{1}{n}}, \quad (3.9)$$

яке відносно величини стоку записується у вигляді

$$Y = X + w_1 - w_2 - E_m \left[1 + \left(\frac{X + w_1 - w_2}{E_m} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (3.10)$$

Рівняння (3.8) містить складову, яка входить у тепловий баланс земної поверхні і водний баланс водозбору. Цією складовою є випаровування з поверхні суші E

$$E = E_m \left[1 + \left(\frac{H}{E_m} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (3.11)$$

Усі наведені рівняння вміщують у собі характеристику E_m – максимально можливе випаровування або теплоенергетичний еквівалент. Теплоенергетичний еквівалент E_m є величиною, яка за своїм фізичним змістом близька до поняття випаровуваності (E_0). Останнє 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); “максимально можливе випаровування з оголеного ґрунту” (Л. Тюрк).

В.С. Мезенцев запропонував новий підхід для оцінки, розділивши приходні та витратні складові рівняння теплового балансу підстильної поверхні. Рівняння теплового балансу підстильної поверхні в загальному вигляді записується таким чином

$$R = LE + P + \Delta B - LC, \quad (3.12)$$

де R – радіаційний баланс підстильної поверхні; L – прихована теплота пароутворення; P – турбулентний теплообмін ґрунту з атмосферою; ΔB – теплообмін з нижчерозташованими шарами ґрунту; LE – витрата тепла на випаровування E , яке складається із транспірації E_T та випаровування з ґрунту E_D , затіненого рослинами; LC – тепло конденсації водяної пари повітря на елементах земної поверхні.

Процес теплообміну в будь-якій точці простору і за будь-який проміжок часу В.С. Мезенцев представив у вигляді надходження й витрат енергії, розклавши окремі доданки рівняння (3.12) на складові

$$R^+ + P^+ + B_1 - B_2 = LE + P^- + I_H - LC, \quad (3.13)$$

де R^+ – додатна (приходна) частина радіаційного балансу підстильної поверхні; P^+ – додатна складова турбулентного теплообміну або тепло, що приходить 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 ΔB), яка для року береться рівною нулю; L – приховане тепло пароутворення; LE – витрата тепла на випаровування; P^- – витрати тепла на нагрівання повітря (від’ємна частина турбулентного теплообміну); I_H – довгохвильове випромінювання земної поверхні в нічні години доби; LC – тепло конденсації водяної пари повітря на елементах земної поверхні, яке зазвичай не враховується, зважаючи на його незначущість в порівнянні з іншими складовими.

Сутність методу водно-теплового балансу полягає у розділенні теплового балансу підстильної поверхні на прибуткову та видаткову складові. Прибуткова (приходна) частина розглядається як граничні ресурси енергії (“теплоенергетичні ресурси клімату”), які забезпечують процес випаровування у заданих кліматичних умовах

$$LE_m = R^+ + P^+ + (B_1 - B_2), \quad (3.14)$$

де R^+ – позитивна (прибуткова) частина радіаційного балансу; P^+ – позитивна складова турбулентного теплообміну або тепло, що приходить 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 ΔB); L – приховане тепло пароутворення.

Величина E_m входить до (3.12) і має назву “теплоенергетичний еквівалент” або “максимально можливе випаровування” і являє собою шар води, який міг би випаритися з поверхні суші, якби на процес випаровування були витрачені усі теплоенергетичні ресурси клімату LE_m

$$E_m = \frac{R^+ + P^+ + (B_1 - B_2)}{L}. \quad (3.15)$$

На відміну від інших підходів така інтерпретація поняття “максимального можливого випаровування” надає йому однозначності.

Різниця $w_1 - w_2$, яка представляє собою змінення вологовмісту розрахункового шару ґрунту, набуває істотних додатних та від'ємних значень усередині року (місяці, декади) і в окремі роки (групи років).

Для багаторічного періоду, коли виконується умова

$$w_1 - w_2 = 0, \quad (3.16)$$

рівняння водно-теплого балансу набуває вигляду

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E}_m \left[1 + \left(\frac{\bar{X}}{\bar{E}_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (3.17)$$

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

Норма річного стоку \bar{Y} , визначена за (3.15), обумовлюється кліматичними чинниками – нормою річних опадів \bar{X} й максимально можливого випаровування \bar{E}_m , які підкоряються закону географічної зональності та можуть бути представлені у вигляді карт ізоліній. Таким чином, розраховані при постійному n величини стоку залежать від співвідношення показників ресурсів вологи \bar{X} та тепла \bar{E}_m і

відображають їхню взаємодію, через що одержали назву “кліматичного” стоку (\bar{Y}_K).

3.2 Визначення статистичних параметрів природного річного стоку України за моделлю “клімат-стік”

В Одеському держаному екологічному університеті під керівництвом проф. Є.Д. Гопченка та проф. Н.С. Лободи було розроблено метод визначення характеристик природного річного стоку на основі реалізації водно-теплогового балансу для території України. Для рівнинної території України були побудовані карти ізоліній норм річних опадів, максимально можливого випаровування та кліматичного стоку на топографічній основі 1:500000 та визначені регіональні залежності цих характеристик від висоти місцевості для гірських територій (Українські Карпати та Гірський Крим).

Згідно із наведеним вище рівнянням (3.13) максимально можливе випаровування визначалося за даними актинометричних станцій, яких у середині минулого сторіччя на території України та Молдови було 19. Величина $B_1 - B_2$ бралася рівною нулю для року та багаторічного періоду, отже

$$E_m = \frac{R^+ + P^+}{L} . \quad (3.18)$$

На основі одержаних даних були розроблені емпіричні залежності, які показують зв'язок між розрахованими за (3.16) значеннями E_m та температурами повітря

$$\bar{E}_m = 0,224 \sum \bar{T}_{>10} + 226, r = 0.91; \quad (3.19)$$

$$\bar{E}_m = 0,209 \sum \bar{T}_{>0} + 179, r = 0.87; \quad (3.20)$$

$$\bar{E}_m = 13,3 \sum \frac{IX}{V} \bar{T}_M - 307, r = 0.94; \quad (3.21)$$

де $\sum \frac{IX}{V} \bar{T}_M$ - сума норм середньомісячних температур повітря за літній період (із травня по вересень, включно); $\sum T_{>10}$ - сума температур повітря більша за $10^\circ C$; $\sum T_{>0}$ - сума температур повітря більша за $0^\circ C$.

За розрахунками кліматичного стоку за даними минулих років (1951-1980 рр.) були визначені залежності, які описують зв'язки між багаторічною мінливістю (коефіцієнтом варіації C_V) та нормою річного кліматичного стоку. Для визначення коефіцієнта асиметрії C_S виконано районування відношення C_S/C_V (табл.3.1).

Таблиця 3.1 - Районування відношення C_S/C_V для 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 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

Наприклад, зв'язки між багаторічною мінливістю річного стоку (коефіцієнтом варіації C_V) та нормою річного кліматичного стоку \bar{Y}_K описуються таким рівнянням

$$C_V = \frac{1,5}{\left(\frac{\bar{Y}_K}{10}\right)^{0,62}}, \quad (3.22)$$

де C_V – коефіцієнт варіації річного стоку, а значення 1,5 є коефіцієнтом варіації, що відповідає нормі кліматичного стоку рівній 10 мм ($C_V=1,5$ при $\bar{Y}_K=10$ мм).

Просторо-часові узагальнення характеристик річного стоку, визначених за метеорологічними даними, відкривають можливості визначення статистичних параметрів річного природного стоку та значень стоку у роки різної водності при відсутності даних спостережень або при значній трансформації водогосподарською діяльністю. Установлено, що норми річного кліматичного стоку відповідають нормам зонального стоку річок. Точність визначення статистичних параметрів річного стоку за описаною моделлю знаходиться у межах точності розрахунків цих параметрів за даними гідрометричних спостережень.

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?

РОЗДІЛ 4

СТОХАСТИЧНІ МОДЕЛІ РІЧНОГО СТОКУ

Для оцінки впливу різних видів водогосподарської діяльності на річний стік використовують математичне моделювання. Спочатку на базі інформації минулого виділяють і описують закономірності дії водогосподарських перетворень на стік. Надалі використовують результати моделювання для визначення характеристик стоку в умовах антропогенного впливу. В ОДЕКУ найбільшого розвитку набули стохастичні моделі коливань річного стоку [6].

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 стаціонарність багаторічних коливань стоку, а основні математичні підходи розвиваються на базі теорії стаціонарних випадкових процесів. Зокрема, стохастична теорія багаторічних коливань стоку широко використовує як математичні моделі 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 безпосередньо попереднього випробування.

У простого ланцюга Маркова розподіл ймовірностей наступної випадкової величини залежить лише від значення безпосередньо попередньої величини; ступінь залежності (при заданому характері зв'язаності) визначається величиною коефіцієнта кореляції між суміжними членами ряду.

Різні модифікації опису простого ланцюга Маркова приводять до різних результатів водогосподарського розрахунку, навіть при однаковому значенні їхнього числового параметра – коефіцієнта автокореляції. Тому для опису багаторічних коливань стоку варто рекомендувати таку з цих модифікацій, яка краще відповідає закономірностям коливань, що спостерігаються в природі стоку, і не призводить до істотних помилок в результатах водогосподарських розрахунків.

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

Якщо представити, що Y є випадковою величиною випадкового процесу стоку у перерізі $(i+1)/i$, а величина X - випадковою величиною стоку у перерізі i , то математичне сподівання та середнє квадратичне

відхилення (стандарт) умовного закону розподілу будуть описані таким чином

$$m_{y/x} = \bar{x}_{(i+1)/i} = \bar{x} + r_H(x_i - \bar{x}), \quad (4.1)$$

і умовним стандартом

$$\sigma_{y/x} = \sigma_{(i+1)/i} = \sigma \sqrt{1 - r_H^2}, \quad (4.2)$$

де $m_x = \bar{x}$ – безумовне математичне сподівання розподілу випадкової величини x ; σ – безумовний стандарт розподілу випадкової величини x ; r_H – коефіцієнт кореляції між суміжними членами ряду нормально-розподілених величин.

Вирази (4.1) та (4.2) визначають лінійність кореляції. Вираз (4.2) описує незалежність умовного стандарту від величини попереднього члену (гомоскедастичність). Однак рівняння (4.1) та (4.2) є справедливими тільки для нормально розподілених випадкових величин, а для гама - розподілених порушується як лінійність кореляції, так і гомоскедастичність умовного розподілу; ступінь нелінійності кореляції зростає зі збільшенням коефіцієнта варіації безумовного розподілу.

Для подальшого вирішення задачі моделювання річного стоку використовують наведені формули для моделювання послідовностей, які підлягають трипараметричному гама-розподілу або 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^o .

3. Визначення значень чисел Форстера

а) для безумовного розподілу

$$\Phi_{i+1}^o = \frac{x_{i+1}^o - \bar{x}}{\sigma}; \quad (4.3)$$

б) для умовного розподілу

$$\Phi_{(i+1)/i} = \frac{x_{(i+1)/i} - \bar{x}_{(i+1)/i}}{\sigma_{(i+1)/i}} \quad (4.4)$$

Оскільки між інтегральною функцією і функцією забезпеченості існує зв'язок, представлений у вигляді $F(x) = 1 - P(x) = 1 - \delta$, то можна зробити висновок, що кожному випадковому числу δ відповідають однакові значення Φ_{i+1}^o та $\Phi_{(i+1)/i}$, тобто

$$\frac{x_{(i+1)/i} - \bar{x}_{(i+1)/i}}{\sigma_{(i+1)/i}} = \frac{x_{i+1}^o - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (4.5)$$

З урахуванням позначень (4.1) та (4.2) одержимо

$$x_{(i+1)/i} = \bar{x} + r_n(x_i - \bar{x}) + (x_{i+1}^o - \bar{x})\sqrt{1 - r_n^2}, \quad (4.6)$$

де $x_{(i+1)/i}$ – кожне наступне значення модельованого ряду з урахуванням його залежності від попереднього; x_{i+1}^o – кожне наступне значення модельованого ряду при $r_n = 0$.

Проблема полягає у тому, що у моделі використовуються формули (4.1) та (4.2) для нормально розподілених величин, у той час як коливання стоку описується іншими статистичними законами.

Останнім часом використовується розроблений в Інституті водних проблем РАН (Російська Федерація) інший принцип конструювання ланцюга Маркова для опису рядів річного стоку, який спирається на наявність кореляції між забезпеченостями суміжних членів ряду; при цьому математичне сподівання умовного розподілу ймовірностей наступного члена буде змінюватися в тій мірі, у якій значення забезпеченості попередніх членів відхиляються від медіани; кореляція буде зв'язувати випадкові величини, розподілені рівномірно в інтервалі від нуля до одиниці. Особливістю такого роду кореляції є те, що структура послідовності забезпеченостей випадкових величин не залежить ні від типу їхнього розподілу, ні від числових значень параметрів цього розподілу. Таким чином, запропонована модель застосовує кореляцію між забезпеченостями (рівномірно розподіленими випадковими величинами).

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

$$f_1(x) = \frac{1}{2}, \quad f_2(y) = \frac{1}{2}. \quad (4.7)$$

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 двовимірну щільність запишеться у вигляді

$$f(x, y) = \frac{1}{4} \left[1 + 3r_0xy + \frac{5}{4}r_0^2 (3x^2 - 1)(3y^2 - 1) \right], \quad (4.8)$$

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

$$f(u, v) = f(P_{i+1}, P_i) = 1 + 3\lambda(2u - 1)(2v - 1) + \frac{5}{4}\lambda^2 [3(2u - 1)^2 - 1] \cdot [3(2v - 1)^2 - 1], \quad (4.9)$$

де λ – коефіцієнт кореляції між забезпеченостями.

Умовна щільність розподілу величини v буде представлена виразом

$$f(v/u) = \frac{f(u, v)}{f_1(u)}, \quad (4.10)$$

а умовна функція розподілу –

$$F(v/u) = \int_0^v f(u, v) dv = \quad (4.11)$$

$$= v + 3\lambda(2u - 1)(v^2 - v) + 5\lambda^2(6u^2 - 6u + 1)(2v^3 - 3v^2 + v)$$

Умовна функція розподілу для величини u записується у вигляді

$$F(u/v) = u + 3r\lambda(2v-1)(u^2 - u) + \frac{5}{2}\lambda^2 \left[3(2v-1)^2 - 1 \right] (2u^3 - 3u^2 + u) \quad (4.12)$$

Умовне математичне сподівання дорівнює

$$m(u/v) = \bar{P}_{(i+1)/i} = \frac{1}{2} + \frac{r_0}{2}(2P_i + 1), \quad (4.13)$$

а умовна дисперсія

$$\sigma_{u/v}^2 = \sigma_{(i+1)/i}^2 = \frac{1 - \lambda^2}{12}. \quad (4.14)$$

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

Рівняння (4.9) 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 в (4.12). Далі з таблиці випадкових чисел $[0, 1]$ беруться значення функції розподілу $F(v/u)$ і для знаходження випадкового значення v_1 вирішується кубічне рівняння (4.12). 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 λ 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

$$r_r = \frac{3}{\pi} \lambda \quad (4.15)$$

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 побутового стоку (ОДЕКУ) генерування штучних рядів здійснювалося як моделювання послідовностей випадкових величин, зв'язаних кореляцією марковського нелінійного типу з маргінальним трипараметричним гама-розподілом С.М.Крицького і М.Ф.Менкеля.

Контрольні запитання

1. Що представляє собою ланцюг Маркова?
2. Які закони розподілу найчастіше використовують при моделюванні річного стоку?
3. Опишіть принцип конструювання ланцюга Маркова для опису рядів річного стоку, який використовується останнім часом.

РОЗДІЛ 5
ІМІТАЦІЙНЕ СТОХАСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ПОБУТОВОГО РІЧНОГО СТОКУ

Зміна поверхневих водних ресурсів річок, які зазнають впливу змін клімату та водогосподарських перетворень у межах водозбору, описується таким диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + L(\Lambda, Y) = \varepsilon, \quad (5.1)$$

де Y – характеристика водних ресурсів; $L(\Lambda, Y)$ – характеристика внутрішніх впливів (насамперед, водогосподарської діяльності), яка має назву оператора перетворення; ε – характеристика зовнішніх впливів на водозбір (кліматичних змін); Λ – функції та коефіцієнти, які характеризують фізичні, геометричні, морфологічні та інші параметри системи; t – час.

Після інтегрування (5.1) результуюче рівняння набирає такого вигляду

$$Y(t) = Y(t_0) - \int L(\Lambda, Y)dt + \int \varepsilon dt, \quad (5.2)$$

де $Y(t_0)$ – початковий стан системи, тобто стан водних ресурсів до початку змін глобального клімату при відсутності водогосподарської діяльності (так званий природний стік); $Y(t)$ – стан системи на час t , який є результатом впливу водогосподарської діяльності та кліматичних змін.

За умови відсутності зовнішніх впливів на стік величина $Y(t)$ буде результатом лише водогосподарських перетворень (так званий побутовий стік).

Початковий стан водогосподарської системи $Y(t_0)$ відповідає природному стоку $Y_{ПР}$, який має стохастичну природу. Водоспоживання у багатьох випадках також має стохастичний характер, що дозволяє припустити збереження стохастичної природи побутового $Y_{ПОБ}$ (порушеного водогосподарською діяльністю) стоку. Ця обставина дозволила представити загальний запис рівняння водогосподарського балансу у стохастичному вигляді

$$Y_{ПОБ, P} = Y_{ПР, P} \pm \Delta Y_P(U_{P1}, f), \quad (5.3)$$

де $Y_{ПОВ, P}$ – шар побутового (трансформованого водогосподарською діяльністю) річного стоку заданої забезпеченості $P\%$; $Y_{ПР, P}$ – шар природного річного стоку заданої забезпеченості $P\%$; ΔY_P – зміни водності річки у роки забезпеченості $P\%$ в залежності від характеристик водогосподарської діяльності; U_{P1} – характеризує ту частину складової водогосподарського балансу, яка залежить від кліматичних умов та має стохастичну природу, але забезпеченість цієї складової може відрізнитись від забезпеченості водності року (наприклад, втрати на випаровування з водної поверхні, дефіцит споживання води рослинами та ін.); f – характеризує невідповідності складові водогосподарських балансів (площу зрошування, осушування, водної поверхні штучних водойм та інше).

Реалізації природного річного стоку моделювалися за трипараметричним гама-розподілом із використанням лінійної кореляції між забезпеченостями суміжних років з подальшим переходом до величин стоку.

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

$$W_{ПОВ} = W_{ПР} - \Delta W_3 + \Delta W_{СК}, \quad (5.4)$$

де $W_{ПОВ}, W_{ПР}$ – об'єми побутового та природного стоку; ΔW_3 – вилучення вод з поверхневих водотоків; $\Delta W_{СК}$ – скидання вод у поверхневі водотоки.

На першому етапі створення моделей розглядалося питання щодо оцінки окремих складових водогосподарських балансів, які містять в собі інформацію про характер господарської діяльності в межах водозборів. На другому етапі здійснювався перехід до ймовірнісної форми запису рівняння.

Рівняння (5.3) є теоретичною основою імітаційного моделювання річного стоку, що знаходиться під впливом антропогенних чинників [7].

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, мають таку редакцію:

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

$$Y_{\text{ПОБ},P} = Y_{\text{ПР},P} - \frac{M_{0,100-P}}{\eta} f_{3P} ; \quad (5.5)$$

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

$$Y_{\text{ПОБ},P} = Y_{\text{ПР},P}(1 - f_B) - (E_B - X)_{100-P} f_B ; \quad (5.6)$$

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

$$Y_{\text{ПОБ},P} = Y_{\text{ПР},P} + \xi \frac{M_{0,100-P}}{\eta} (1 - \eta) f_{3P} ; \quad (5.7)$$

г) при осушуванні боліт та заболочених земель

$$Y_{\text{ПОБ},P} = Y_{\text{ПР},P} + \mu \Delta H_{\text{ГР},P} f_{\text{ОС}} + (w_{\text{ПР}} - w_{\text{ОС}}) \Delta H_{\text{ГР},P} f_{\text{ОС}} ; \quad (5.8)$$

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 ; η - коефіцієнт корисної дії зрошувальної системи; ξ - 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 $100 - P$; μ - коефіцієнт водовіддачі ґрунтів, який оцінюється як різниця між повною й найменшою вологемністю 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, км².

На вході у моделі побутового 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, описаного вище.

При відсутності даних спостережень за стоком у природних умовах його формування використовують методику, описану у розділі 3, тобто 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, 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 визначені статистичні параметри річного побутового стоку, які відповідають заданим масштабам водогосподарської діяльності та стану клімату. Результати стохастичного моделювання були узагальнені у вигляді аналітичних функцій, які є “функціями відгуку” статистичних параметрів річного стоку на водогосподарські перетворення. Оскільки в межах однієї і тієї ж річки кількісний склад чинників може змінюватися, з метою урахування сумісного впливу водогосподарських чинників запропоновано використовувати “коефіцієнти антропогенного впливу”

$$k_A = \frac{A_f}{A_0}, \quad (5.9)$$

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.

Встановлено, що вплив антропогенних чинників посилюється у міру збільшення масштабів водогосподарських перетворень, до яких відносяться площі осушування, площі зрошування, кількість населення, площі водної поверхні штучних водойм та зменшення загального зволоження території. Непрямим показником загального зволоження території може служити норма кліматичного річного стоку.

Сумісна дія m водогосподарських чинників може враховуватись за таким рівнянням

$$A_f = A_0[k_1 + k_2 + k_3 \dots + k_m - (m - 1)], \quad (5.10)$$

де $k_1, k_2, k_3, \dots, k_m$ – коефіцієнти, які кількісно враховують зміни статистичних параметрів річного стоку.

Для кількісної оцінки впливу додаткового випаровування з водної поверхні штучних водойм на річний стік використані функції антропогенного впливу такого вигляду

$$k_{\bar{Y}} = e^{-\alpha_{\bar{Y}} f_B}; \quad (5.11)$$

$$k_{C_V} = e^{\alpha_{C_V} f_B}; \quad (5.12)$$

$$k_{C_S} = e^{\alpha_{C_S} f_B}, \quad (5.13)$$

де $k_{\bar{Y}}, k_{C_V}, k_{C_S}$ – коефіцієнти впливу додаткового випаровування з поверхні штучних водойм на статистичні параметри річного побутового стоку \bar{Y}, C_V, C_S ; α_A – коефіцієнти антропогенного впливу на параметр A , які залежать від норми кліматичного стоку \bar{Y}_K як інтегрального показника зволоженості водозбору.

Антропогенний коефіцієнт, який характеризує втрати на заповнення штучних водойм водою, визначається як відношення

$$\frac{\bar{W}_{PP} - \bar{W}_3}{\bar{W}_{PP}} = \frac{W_{ПОВ}}{W_{PP}} = k_{\bar{Y},3}, \quad (5.14)$$

де \bar{W}_{PP} – об'єм природного стоку, який надходить до водосховищ або ставків; \bar{W}_3 – об'єм заповнення; $k_{\bar{Y},3}$ – коефіцієнт втрат на заповнення штучних водойм.

Для кількісної оцінки впливу зрошування розраховуються коефіцієнти антропогенного впливу за такими виразами:

- за рахунок місцевих водних ресурсів

$$k'_{\bar{Y}} = 1,00 - a_{\bar{Y}} \lg(f_{3P} + 1) - b_{\bar{Y}} v_0 + m_{\bar{Y}} \eta, \quad (5.15)$$

$$k'_{C_V} = 1,00 + a_{C_V} \lg(f_{3P} + 1) + b_{C_V} v_0 - m_{C_V} \eta, \quad (5.16)$$

$$k'_{C_S} = 1,00 + a_{C_S} \lg(f_{3P} + 1) + b_{C_S} v_0 - m_{C_S} \eta, \quad (5.17)$$

- за рахунок річки-донора

$$k''_{\bar{Y}} = 1,00 + a_{\bar{Y}} f_{3P} + b_{\bar{Y}} v_0 + d_{\bar{Y}} \xi - m_{\bar{Y}} \eta, \quad (5.18)$$

$$k''_{C_v} = 1,00 - a_{C_v} f_{3P} - b_{C_v} v_0 - d_{C_v} \xi + m_{C_v} \eta, \quad (5.19)$$

$$k''_{C_s} = 1,00 + a_{C_s} f_{3P} + b_{C_s} v_0 + d_{C_s} \xi - m_{C_s} \eta, \quad (5.20)$$

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; $k''_{\bar{Y}}$, k''_{C_v} , k''_{C_s} – коефіцієнти впливу зрошування із річки-донора на середню багаторічну величину стоку \bar{Y} та на коефіцієнти варіації C_v й асиметрії C_s , відповідно; f_{3P} – відносна площа зрошуваних земель; v_0 – безрозмірна характеристика середнього за весь вегетаційний період рівня зволоження ґрунту, при якому розвиток відповідної сільськогосподарської культури є оптимальним; ξ – коефіцієнт зворотних вод; η – коефіцієнт корисної дії зрошувальної системи; a_A, b_A, d_A, m_A – коефіцієнти рівнянь множинної регресії для різних статистичних параметрів стоку A .

Представлена методика оцінок природного та побутового стоку увійшла до складу нормативних документів по розрахунках характеристик стоку України та Молдови.

Контрольні запитання

1. Які види водогосподарської діяльності може враховувати модель “клімат-стік” при розрахунках побутового стоку?
2. Що називається коефіцієнтами антропогенного впливу?
3. Як враховується вплив додаткового випаровування з водної поверхні штучних водойм при розрахунках стоку?

РОЗДІЛ 6
**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНИХ
РЕСУРСІВ ЗА СЦЕНАРІЯМИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ НА
ОСНОВІ МОДЕЛІ “КЛІМАТ-СТІК”**

Модель “клімат–стік” дозволяє розраховувати характеристики річного кліматичного стоку, внутрішньорічний розподіл та характеристики мінімального стоку на основі використання даних сценаріїв глобального потепління.

Кліматичний стік, який залежить від співвідношення ресурсів вологи та тепла, відображає зміни клімату. Визначення середнього багаторічного значення кліматичного річного стоку \bar{Y}'_K відбувається за (3.17). Складовими рівняння є середні багаторічні опади та максимально можливе випаровування, які розраховуються за даними кліматичних сценаріїв. Рівняння водно-теплого балансу за багаторічний період в умовах змін клімату записується у такому вигляді

$$\bar{Y}'_K = (\bar{X} \pm \Delta\bar{X}) - \bar{E}'_m \left[1 + \left(\frac{\bar{X} \pm \Delta\bar{X}}{\bar{E}'_m} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (6.1)$$

де \bar{Y}'_K – середня багаторічна величина кліматичного річного стоку в умовах змін клімату, мм; \bar{E}'_m – середня багаторічна величина максимально можливого випаровування в умовах змін клімату, мм; \bar{X} – вихідна норма річних опадів, мм; $\Delta\bar{X}$ – зміни опадів за сценаріями, мм.

Матеріали сценаріїв змін глобального клімату у наукових розробках кінця минулого сторіччя представлялися у вигляді поправкових коефіцієнтів k_X до сум середніх багаторічних опадів, при цьому зміна опадів оцінювалась як $\Delta\bar{X} = k_X \bar{X}$, та поправок ΔT до величин середніх багаторічних температур повітря за календарні місяці. Величина максимально можливого випаровування розраховувалася за (3.18) з використанням сценарних даних про зміни температур повітря $\bar{E}'_m = f(T + \Delta T)$.

Числові експерименти, виконані на основі рівняння водно-теплого балансу (3.17), показали, що зміна середніх багаторічних величин кліматичного річного стоку стає значущою, тобто перевищує точність розрахунку даної величини, при зміні річних опадів на $\pm 3,5\%$ або при зміні сум середніх місячних температур повітря за період червень-серпень на $\pm 2,5^\circ C$.

Передбачувані сценаріями Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) зміни метеорологічних характеристик, як правило, перевищують зазначені межі й, отже, модель «клімат-стік» може успішно застосовуватись для прогнозування стану водних ресурсів України за різними сценаріями змін глобального клімату.

За більш детальними сучасними сценаріями прогноз стоку стало можливим виконувати за короткі інтервали часу, використовуючи рівняння вигляду (3.10). Рівняння водно-теплого балансу для розрахунків кліматичного стоку по місяцях та сезонах за даними кліматичних сценаріїв має вигляд

$$Y'_K = X' + (w_1 - w_2)' - E'_m \left[1 + \left(\frac{X' + (w_1 - w_2)'}{E'_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (6.2)$$

де Y'_K – значення кліматичного стоку за розрахунковий період в умовах змін клімату, мм; E'_m – значення максимально можливого випаровування за розрахунковий період в умовах змін клімату, мм; X' – сума річних опадів за розрахунковий період в умовах змін клімату, мм; $(w_1 - w_2)'$ – зміна запасів води у діяльному шарі ґрунту за розрахунковий період в умовах змін клімату, мм.

Для розрахунків за (6.2) необхідні дані не тільки про річну величину $E'_{m,pik}$, а й про її розподіл по місяцях та сезонах. Величина максимально можливого випаровування $E'_{m,pik}$ визначалася для кожного року за сценарними даними про середні місячні температури повітря на базі рівняння (3.18). Значення максимально можливого випаровування за кожен розрахунковий місяць представлені у відсотках від величини $E'_{m,pik}$, яка розподілялась у межах року пропорційно внутрішньорічному розподілу дефіциту вологи у повітрі

$$E'_{m,i} = E'_{m,pik} \frac{d_i}{\sum_1^{12} d_i}, \quad (6.3)$$

де $E'_{m,i}$ – максимально можливе випаровування для кожного розрахункового місяця або сезону, мм; $E'_{m,pik}$ – річне значення

максимально можливого випаровування, мм; d_i – значення дефіциту вологи повітря за кожен місяць, гПа.

У випадку, коли у сценаріях глобального потепління були відсутні матеріали про дефіцит вологи у повітрі, для кожного пункту спостережень або вузлів сітки розроблялись емпіричні залежності d_i від температури повітря. Такого роду залежності розробляються по окремих метеостанціях за даними минулих років (табл.6.1).

Таблиця 6.1 - Розрахункові залежності $d_i = f(T_i)$, визначені для метеорологічних станцій Північно-Західного Причорномор'я

№	Назва метеостанції	Координати		Вид рівняння $d_i = f(T_i)$
		широта	довгота	
1	Ізмаїл	45°21'	28°50'	$d_i = 1,432e^{0,095T}$
2	Миколаїв	46°54'	32°09'	$d_i = 1,107e^{0,096T}$
3	Сарата	46°01'	29°40'	$d_i = 1,343e^{0,098T}$
4	Херсон	46°38'	32°36'	$d_i = 1,084e^{0,102T}$
5	Вознесенськ	47°34'	31°18'	$d_i = 1,097e^{0,10T}$

Головна проблема розрахунків кліматичного стоку по внутрішньорічних інтервалах за даними сценаріїв полягає у визначенні внеску твердих опадів зимового сезону у формування весняного водопілля. У загальному випадку певна частина опадів зимового сезону накопичується на водозборі і при стійкому переході температури повітря через 0 °С утворює поверхневий талий стік. Таким чином, при розрахунках за методом водно-теплового балансу виникає необхідність перенесення частини опадів зимового сезону на весняний. З метою установлення цієї частки виконувалось співставлення розрахункових значень кліматичного та фактичного стоку по сезонах та місяцях у різні за водністю роки та проводились оптимізаційні розрахунки. Визначення кліматичного стоку відбувалося на базі даних метеорологічних станцій, розташованих поблизу від вузлів сітки із сценарними даними. Як опорний підбирався водозбір із стійким підземним живленням та практично непорушеним водогосподарською діяльністю водним режимом.

Особливого значення проблема установлення ролі твердих опадів у формуванні стоку весняного водопілля набуває у зоні степу, де сніговий покрив нестійкий й спостерігається менше, ніж у 50% випадків. До періодів, коли спостерігалися тверді опади, що накопичувалися у вигляді запасів снігу на водозборі, можна віднести лише ті, протягом яких спостерігалася від'ємна температура повітря. Загальна кількість опадів

зимового сезону у зоні степу може значно відрізнятись від кількості опадів, які беруть участь у формуванні весняного водопілля.

Шляхом оптимізаційних розрахунків за даними минулих років для території України визначалися частки опадів зимового сезону, які мають перенестись на весняний сезон при визначенні кліматичного стоку за водно-тепловим балансом у багатоводні, маловодні та середні за водністю роки. Наприклад, виявлено, що на території Північно-Західного Причорномор'я у багатоводний рік лише 30% твердих опадів зимового сезону беруть участь у формуванні весняної повені. У середній та маловодній роки перенос опадів зимового сезону на весняний не має сенсу, оскільки накопичені у короткий період існування від'ємних температур повітря запаси снігу витрачаються під час відлиг, утворюючи поверхневий стік у межах зимового сезону.

При розрахунках за сценаріями глобального потепління для кожного розрахункового періоду має визначатися розподіл стоку у відсотках для багатоводного, середнього за водністю та маловодного року, окремо. Водність року устанавлюється в залежності від статистичної забезпеченості (ймовірності перевищення) величини стоку. Щоб устанавити забезпеченість водності у розрахункові періоди майбутнього, наведеного у сценаріях змін клімату, рекомендується використовувати

співвідношення між ресурсами вологи та тепла $\left(\beta_H = \frac{H}{E_m} \right)$. Як показник ресурсів вологи, взята сума опадів X та змін вологи $(w_1 - w_2)$ у ґрунті $(H = X + w_1 - w_2)$. Як характеристика ресурсів тепла, використана величина максимально можливого випаровування або теплоенергетичний еквівалент E_m . Забезпеченість річного стоку P бралася рівною забезпеченості величини β_H .

Після устанавлення забезпеченості кожного розрахункового року, узагальнювалися особливості внутрішньорічного розподілу по місяцях та сезонах для багатоводного, маловодного та середнього за водністю років.

Після вирішення проблеми визначення внутрішньорічного розподілу стоку стають можливими оцінки сезонного та місячного кліматичного стоку за рівнянням (6.2).

Розрахунок кліматичного стоку за багаторічний період з використанням даних сценаріїв глобального потепління виконують за формулою

$$\bar{Y}'_K = \bar{X}' - \bar{E}'_m \left[1 + \left(\frac{\bar{X}'}{\bar{E}'_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}. \quad (6.4)$$

Контрольні запитання

1. Який вигляд має рівняння водно-теплового балансу за багаторічний період в умовах змін клімату?
2. В чому полягає головна проблема розрахунків кліматичного стоку по внутрішньорічних інтервалах за даними сценаріїв?

РОЗДІЛ 7
ОЦІНКА ЗМІН ВОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ ЗА СЦЕНАРІЄМ
ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ А1В

Характеристикою зволоженості (посушливості) території є співвідношення між ресурсами вологи й тепла для багаторічного періоду, яке може бути представлене через максимального можливого випаровування як однієї з головних складових рівняння водно-теплового балансу

$$\beta_X = \frac{\bar{X}}{\bar{E}_m}, \quad (7.1)$$

де \bar{X} – середнє багаторічне значення річних опадів, мм; \bar{E}_m – середнє багаторічне значення максимального можливого випаровування, мм.

За величиною β_X можна виділити області зволоженості або посушливості:

$$\beta_X \geq 1,0 \text{ – зона надмірного зволоження,} \quad (7.2)$$

$$0,8 < \beta_X < 1,0 \text{ – зона достатнього зволоження,} \quad (7.3)$$

$$0,5 \leq \beta_X < 0,8 \text{ – зона недостатнього зволоження,} \quad (7.4)$$

$$0,20 < \beta_X < 0,50 \text{ – напіваридна зона,} \quad (7.5)$$

$$0,03 < \beta_X < 0,20 \text{ – аридна зона,} \quad (7.6)$$

$$\beta_X < 0,03 \text{ – гіпераридна зона.} \quad (7.7)$$

Значення $\beta_X=0,5$ є межею між зоною недостатнього зволоження та напіваридною зоною.

Середні багаторічні величини річного кліматичного стоку та показника зволоженості β_X , розраховані за даними по 28 метеорологічних станціях України у відповідних вузлах сітки для кліматичного сценарію А1В, були представлені у вигляді карт ізоліній [8]. На рис. 7.1-7.4 показаний просторовий розподіл показника зволоженості β_X у вихідних умовах (до появи статистично значущих змін у коливаннях температур повітря) та за періоди 1986-2005 рр., 2011-2030рр., 2031-2050 рр.

Аналізуючи просторовий розподіл ізолей β_X у часі, можна зробити висновок, що ізолей $\beta_X=0,5$ буде поступово “підніматися” на карті з півдня до півночі, збільшуючи площу, що буде знаходитися під напіваридною зоною. За сценарієм А1В зростання водних ресурсів у порівнянні із минулим сторіччям спостерігатиметься на півночі країни у 1986-2005 рр., про що свідчить зміна положення ізолей $\beta_X=0,9$. Ці результати підтверджуються даними спостережень, згідно з якими водні ресурси річок Полісся на початку XXI сторіччя зростали. У періоди 2011-2030 рр. та 2031-2050 рр. площа території України, де $\beta_X>0,9$ знов зменшуватиметься до початкових розмірів. В усі розрахункові періоди практично не зазнає змін зона надмірного зволоження $\beta_X>1,0$, розташована в Українських Карпатах.

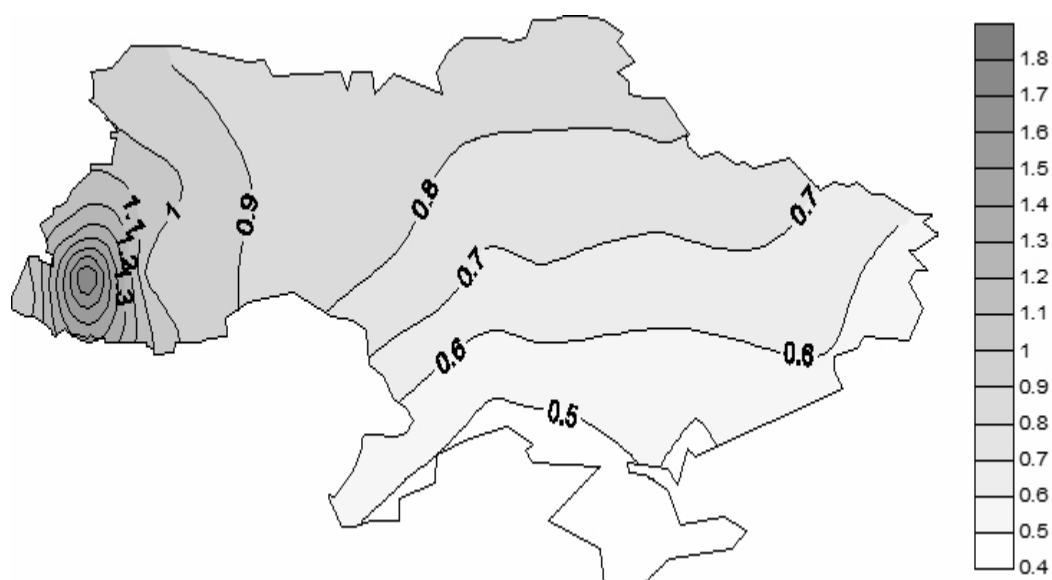


Рис.7.1. Просторовий розподіл показника зволоженості β_X , визначений за даними до 1989 року (до початку значущого впливу глобального потепління)

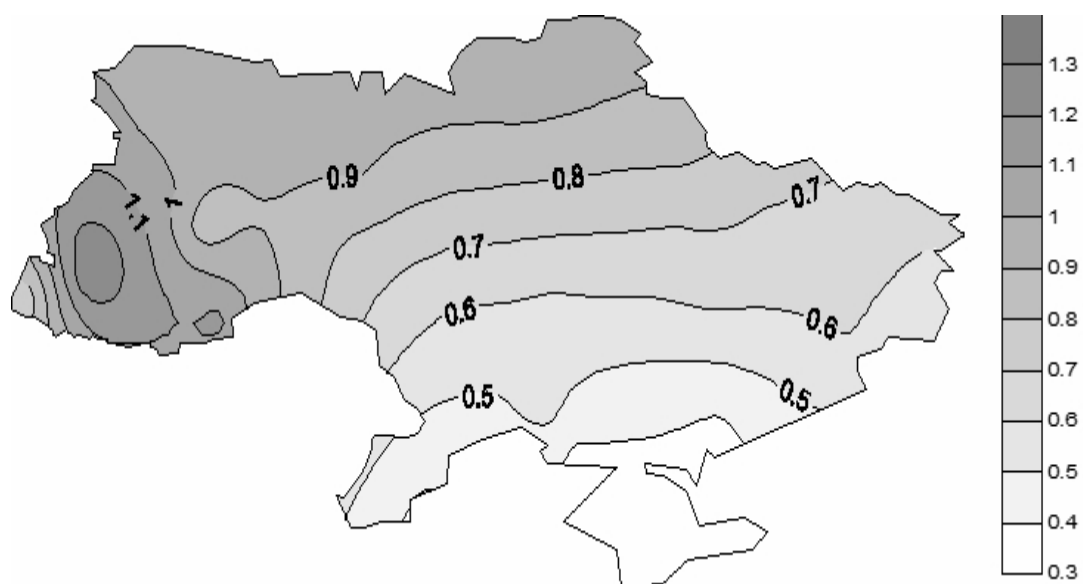


Рис. 7.2. Просторовий розподіл показника зволоженості β_X за даними 1986-2005 рр., сценарій А1В

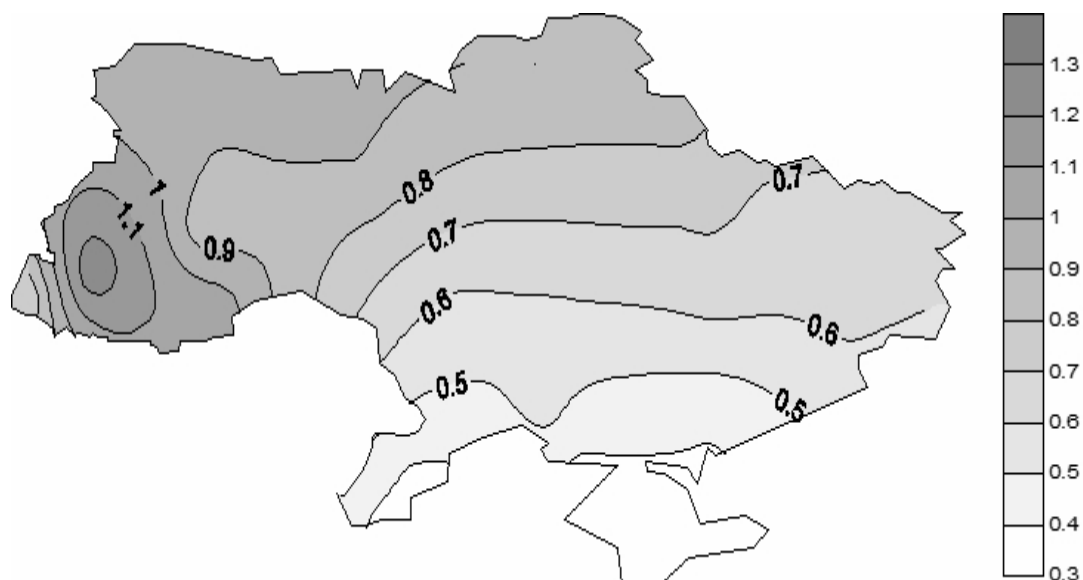


Рис.7.3. Просторовий розподіл показника зволоженості β_X за даними 2011- 2030 рр. , сценарій А1В

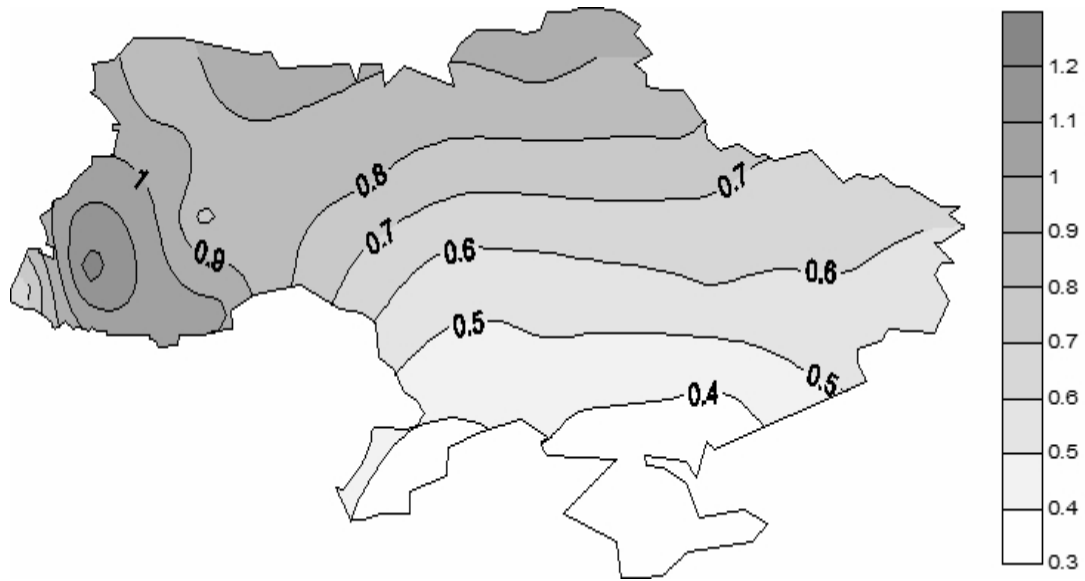


Рис.7.4. Просторовий розподіл показника зволоженості β_X за даними 2031-2050 рр., сценарій А1В

На рисунках (7.5-7.8) представлені норми кліматичного річного стоку України у минулому сторіччі (до початку глобального потепління), які змінювалися на рівнинній частині від 140 мм на північному заході до 20 мм на півдні (рис.7.5). За сценарієм А1В у ХХІ столітті відбуватиметься поступове розширення до півночі зони степу, межею якого може бути розглянута ізолінія норми річного кліматичного стоку, яка дорівнює 30 мм. Ізолінія норм річного кліматичного стоку, яка дорівнює 10 мм, знаходилася у минулому сторіччі на території степового Криму. У період 2031-2050 рр. ця ізолінія згідно із сценарієм А1В “підніметься” на північ, так само як і ізолінія 30 мм (рис. 7.8).

Більш повну уяву про зміни водних ресурсів України за сценарієм може надати карта ізоліній відносних відхилень δ середніх багаторічних величин кліматичного річного стоку за різні розрахункові періоди

$$\delta = \frac{\overline{Y_K'} - \overline{Y_K}}{\overline{Y_K}}, \quad (7.26)$$

де $\overline{Y_K'}$ – середня багаторічна величина річного кліматичного стоку, розрахована за даними сценарію, мм; $\overline{Y_K}$ – середня багаторічна величина річного кліматичного стоку, розрахована за даними до 1989 р. (до початку значущого впливу глобального потепління згідно із висновками В.В. Гребіня).

Нульова ізолінія δ призначена показувати межу між можливими напрямками змін водних ресурсів (рис. 7.9-7.11).

При розрахунках δ за сценарієм визначено, що у період 1986-2005 рр. відбувалося зменшення норм річного кліматичного стоку на півдні України та Закарпатті. Воно досягло мінус 40% у південній частині Одеської області та мінус 50% - у Херсонській. У північній та північно-західній частинах, навпаки, очікується зростання річного стоку від 10 до 50% (рис. 7.9).

У період 2011-2030 рр. розподіл ізоліній норм річного кліматичного стоку буде суттєво змінюватися: нульова ізолінія має “спуститися” до південного сходу (рис. 7.10). Це означає розширення території України, на якій буде відбуватися збільшення водних ресурсів у порівнянні із даними до початку суттєвих змін клімату на території України, тобто до 1989 р.

У період 2031-2050 рр. за сценарієм А1В зменшення водних ресурсів на півдні України буде посилюватись і досягне 60-70%. Зростання стоку відбуватиметься у межах водозборів річок Прип'ять та Десна, а також у межах Українських Карпат. Закарпаття та водозбір р. Західний Буг, лівобережні притоки Дністра увійдуть в область зменшення річного стоку (рис. 7.11).



Рис. 7.5. Просторовий розподіл норм річного кліматичного стоку за даними до 1989 р.



Рис. 7.6. Просторовий розподіл норм річного кліматичного стоку за даними 1986-2005 рр.

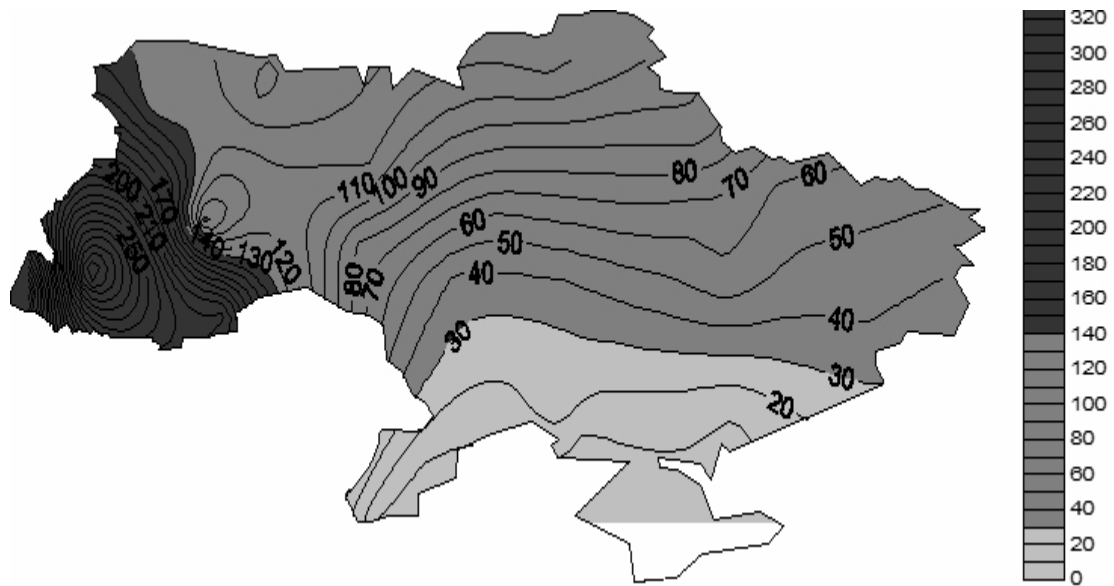


Рис. 7.7. Просторовий розподіл норм річного кліматичного стоку за даними 2011-2030 рр.

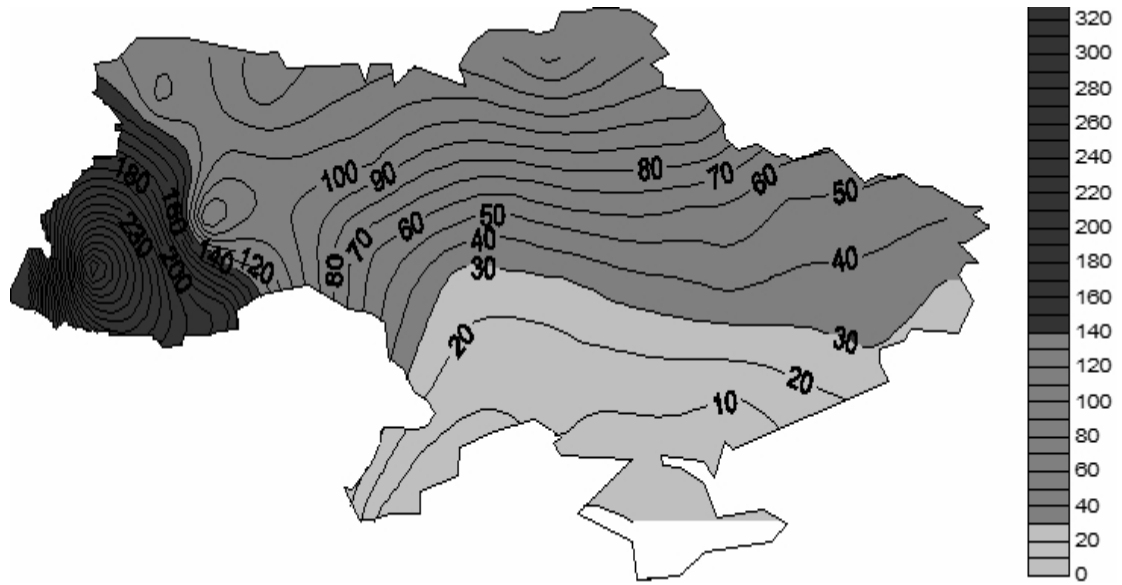


Рис. 7.8. Просторовий розподіл норм річного кліматичного стоку за даними 2031-2050 рр.

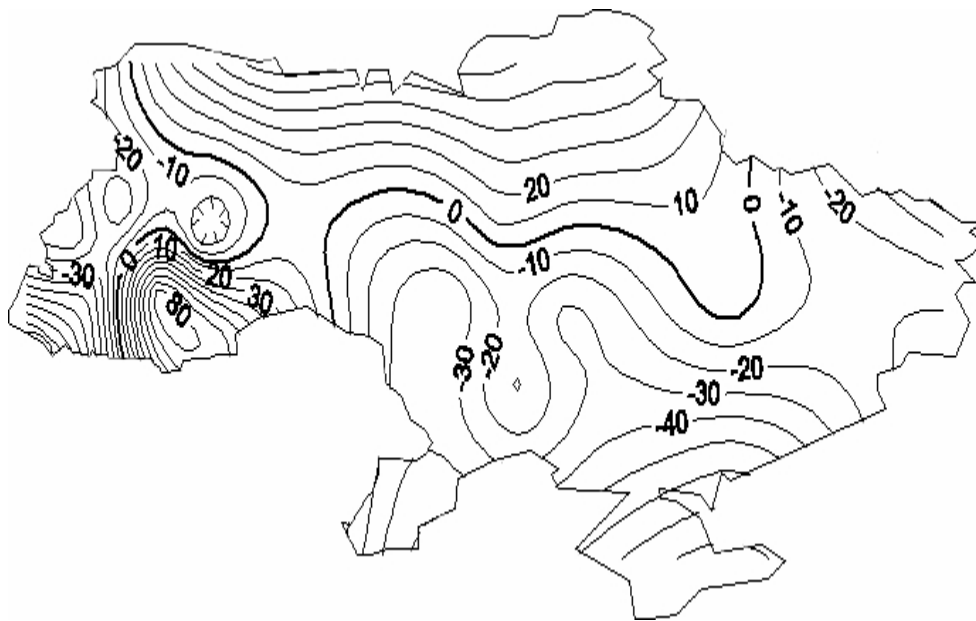


Рис.7.9. Просторовий розподіл відносних відхилень норм річного кліматичного стоку за період 1986-2005 рр. у порівнянні із даними до 1989 р., сценарій А1В

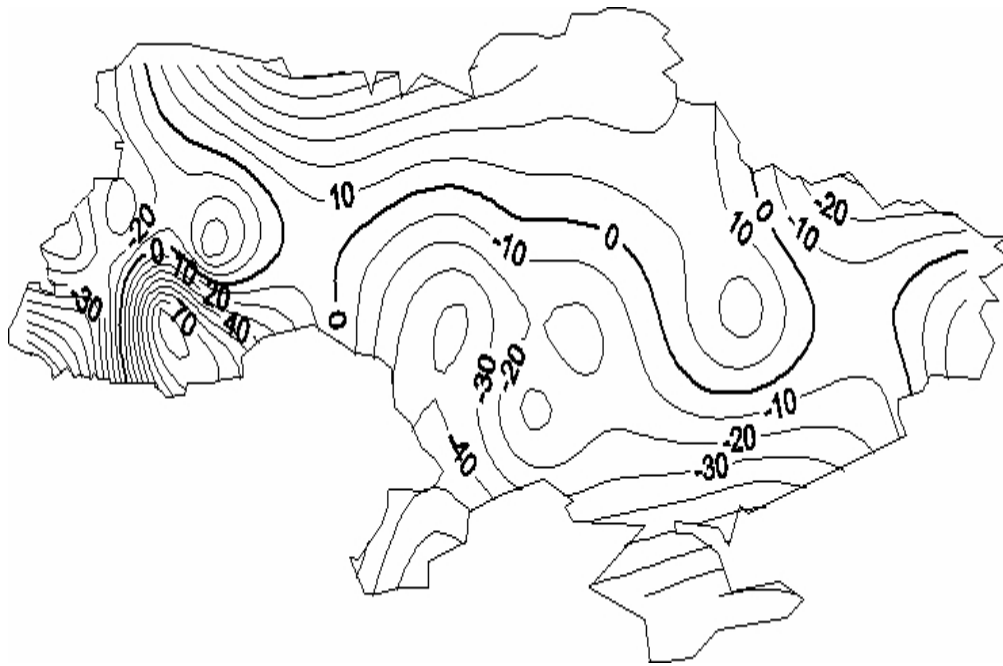


Рис. 7.10. Просторовий розподіл відносних відхилень норм річного кліматичного стоку за період 2011-2030 рр. у порівнянні із даними до 1989 р., сценарій А1В

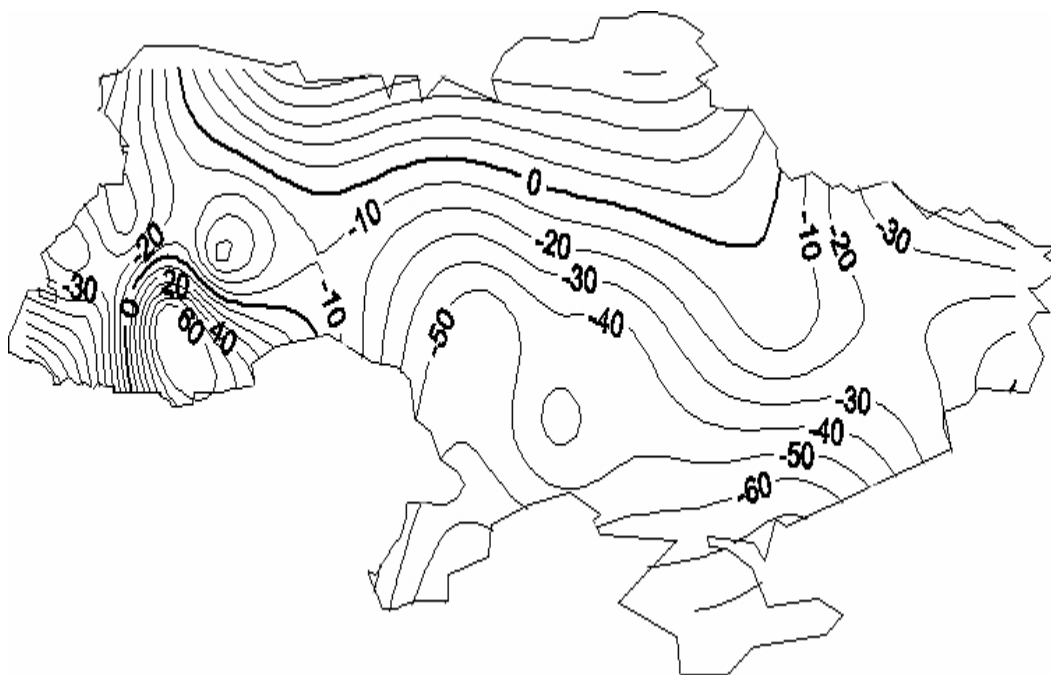


Рис. 7.11. Просторовий розподіл відносних відхилень норм річного кліматичного стоку за період 2031-2050 рр. у порівнянні із даними до 1989 р., сценарій А1В

На період 2011-2030 рр. у внутрішньорічному розподілі стоку по сезонах для рівнинної зони України очікується зростання відсотка стоку, який припадає на весняний сезон (до 7,6%). Внесок стоку літньо-осінньої межени буде зменшуватися: до 5,6% влітку та до 0,9% взимку (табл. 7.1).

Для гірської зони Українських Карпат зміни внутрішньорічного розподілу стоку несуттєві і не перевищуватимуть 2,1%.

Таблиця 7.1 - Зміни внутрішньорічного розподілу стоку (%) за період 2011-2030 рр. у порівнянні із періодом 1986-2005 рр. (сценарій А1В)

Географічна зона	Сезони			
	Зима XII-II	Весна III-V	Літо VI-IX	Осінь X-XI
Гірська зона Українських Карпат	-2,1	-0,50	2,0	0,0
Зона мішаних лісів	1,2	4,8	-5,6	-0,4
Зона лісостепу	-2,3	7,6	-4,4	-0,9
Зона степу	-2,6	3,3	-1,1	-0,3

Ступінь змін водних ресурсів визначається за рекомендаціями ООН, згідно з якими зменшення середньої багаторічної величини річного стоку на 10% класифікується як значущі зміни водних ресурсів; на 50% – як руйнація водних ресурсів, на 70% – як безповоротна руйнація. Отже, у 2011-2030рр. руйнація водних ресурсів спостерігатиметься на півдні і південному заході України, а у 2031-2050 рр. пошириться на Центральну Україну.

Контрольні запитання

1. Як визначається характеристика зволоженості (посушливості) території β_X та її класифікація?
2. Як зміниться показник β_X до середини XXI сторіччя за сценарієм глобального потепління А1В?
3. Що буде відбуватися із водними ресурсами України за сценарієм А1В у періоди 2011-2030 рр., 2031-2050 рр.?

РОЗДІЛ 8
ОЦІНКА ЗМІН ВОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ ЗА СЦЕНАРІЄМ
ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ А2

Просторова динаміка показника зволоженості β_X за сценарієм А2 показує, що у десятиріччя 2011-2030 рр. площа напіваридної зони $\beta_X < 0,5$ буде зменшуватись у порівнянні із 1986-2005 рр. (рис. 8.1, 8.2), а у 2031-2050рр. – зростати (рис. 8.3) [9]. Площі, зайняті зоною надмірного зволоження $\beta_X > 1,0$, які розширилися на заході у 1986-2005 рр., і надалі практично не змінюватимуться. Ізолінія $\beta_X = 0,8$, яка вказує на перехід до зони недостатнього зволоження, буде поволі “спускатися” на південному сході і зменшувати площу цієї зони.

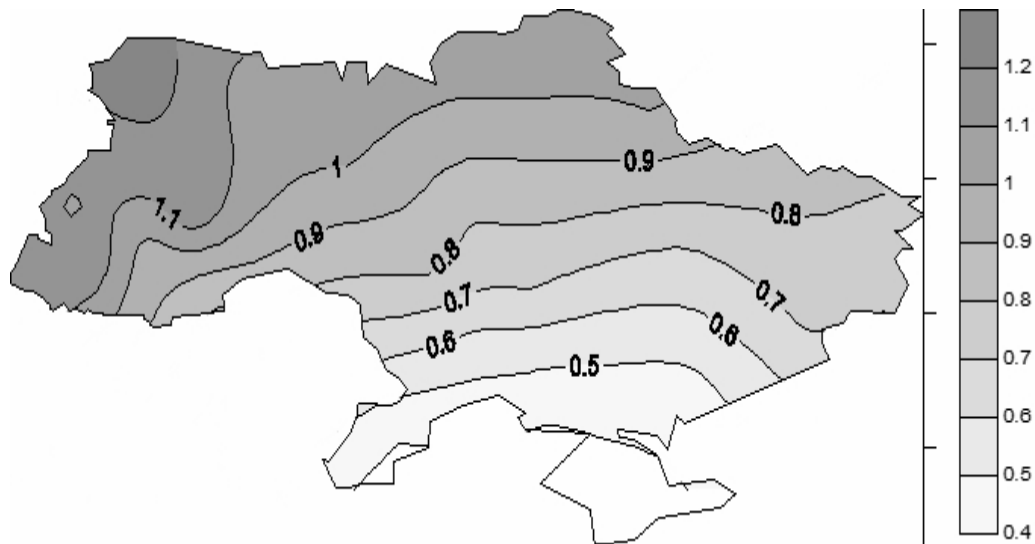


Рис. 8.1. Просторовий розподіл показника зволоженості β_X за даними 1986-2005 рр. за сценарієм А2

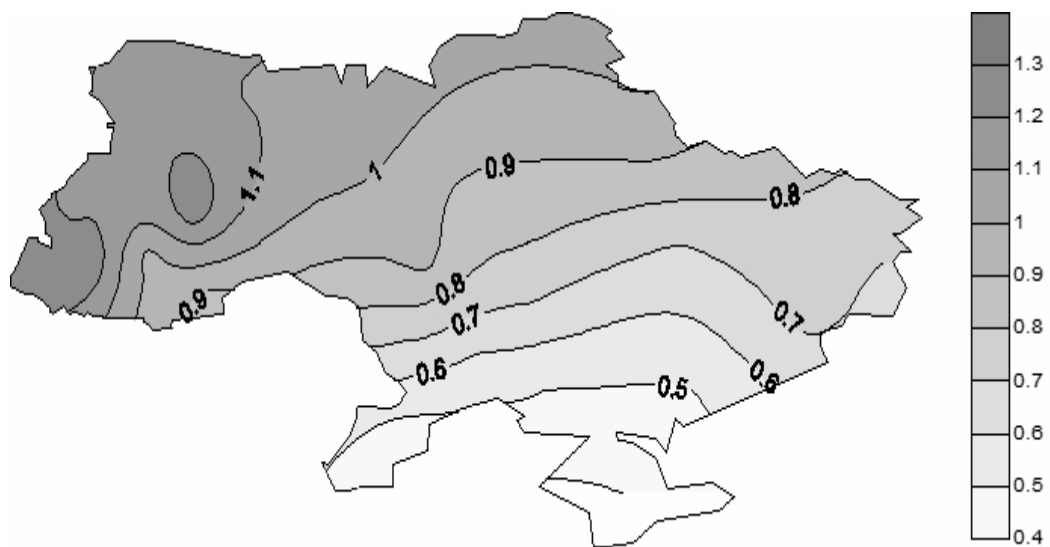


Рис. 8.2. Просторовий розподіл показника зволоженості β_X за даними 2011-2030 рр. за сценарієм А2

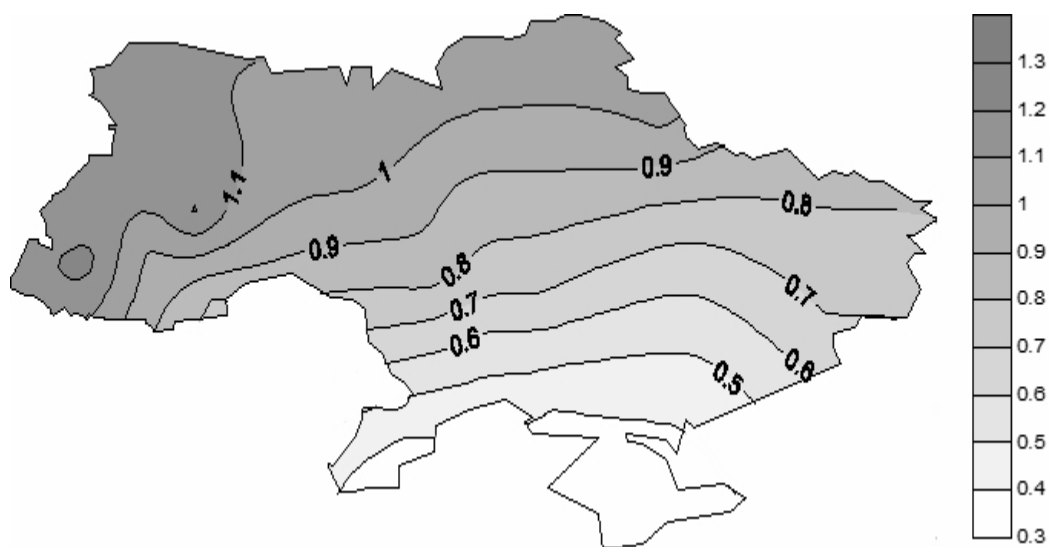


Рис. 8.3. Просторовий розподіл показника зволоженості β_X за даними 2031-2050 рр. за сценарієм А2

При розгляді відносних відхилень δ середніх багаторічних значень річного кліматичного стоку від його значень до початку змін клімату (див. рис. 7.5), можемо зазначити, що область від'ємних змін за сценарієм А2 має зайняти весь південь України та Закарпаття й Буковину у 1985-2005рр. (рис. 8.4), але вона дещо скоротиться у 2011-2030 рр. (рис. 8.5), й надалі (у 2031-2050 рр.) буде знов розширюватися, особливо на південному сході країни (рис. 8.6). На півночі, в центрі та сході України до 2030 р. очікується зростання водних ресурсів до 80% у порівнянні із минулим сторіччям (до 1989 р.). Збільшення водних ресурсів у 2011-2030 рр. буде забезпечуватись зростанням опадів. У 2031-2050 рр. опади почнуть зменшуватись, а максимально можливе випаровування зростатиме, що спричинить уповільнення процесу зволоження території та розширення напіваридної зони. Порівняння розрахованих норм річного кліматичного стоку за період 2031-2050 рр. із результатами розрахунків за 2011-2031 рр. показало, що на більшій частині України водні ресурси почнуть зменшуватись і лише у Поліссі та північному сході України буде відбуватися їх зростання до 20% (рис. 8.7).

Таким чином, з точки зору збереження водних ресурсів України сценарій А2 є більш "м'яким" у порівнянні із сценарієм А1В. Проте, у південних областях зменшення водних ресурсів буде посилюватись і у Одеській області досягне стану руйнації (більше 50 відсотків). Розвиток подій за сценарієм А2 указує на зростання різниці у забезпеченні водою південних і північних областей України. Однак наслідки глобального потепління, які прогнозуються за сценарієм А2, будуть не такі катастрофічні як за сценарієм А1В.

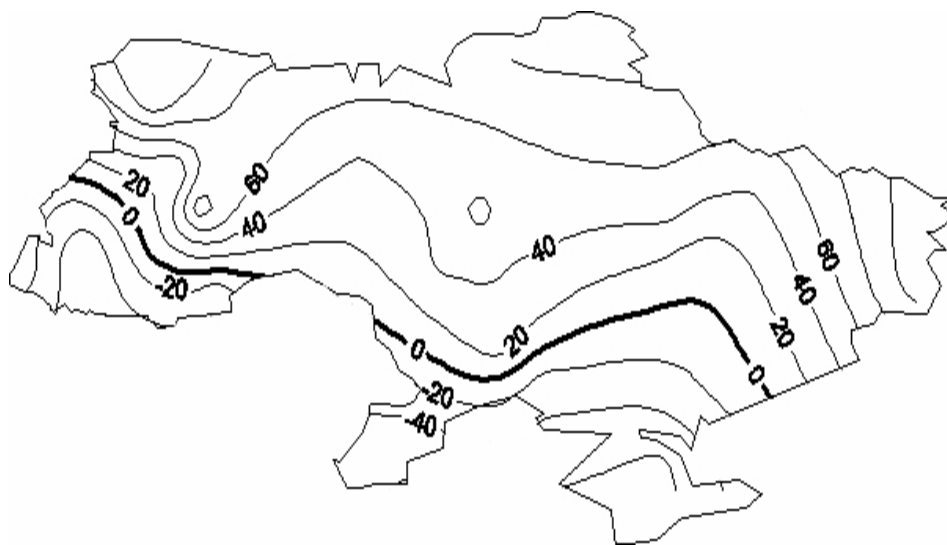


Рис. 8.4. Просторовий розподіл відносних відхилень норм річного кліматичного стоку за період 1986-2005 рр. у порівнянні із даними до 1989 р. (сценарій А2)

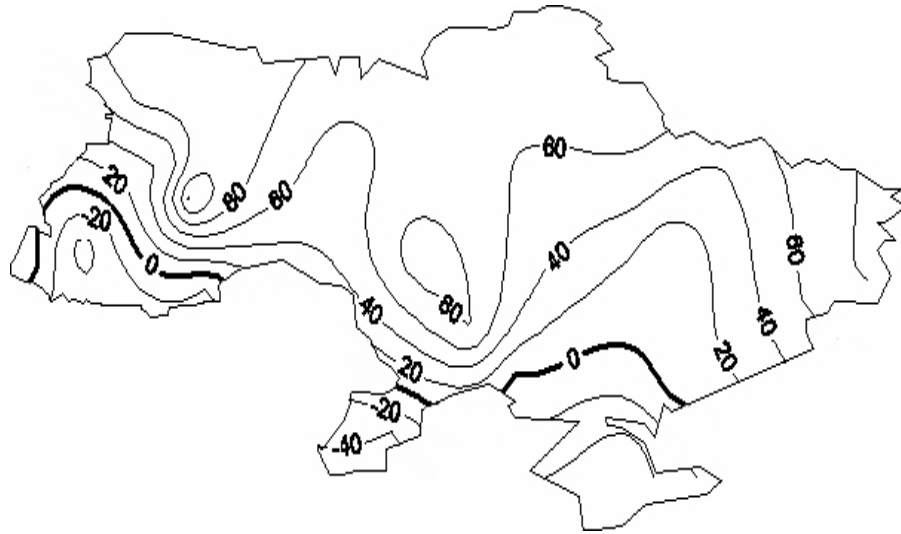


Рис. 8.5. Просторовий розподіл відносних відхилень норм річного кліматичного стоку за період 2011-2030 рр. у порівнянні із даними до 1989 р. (сценарій А2)

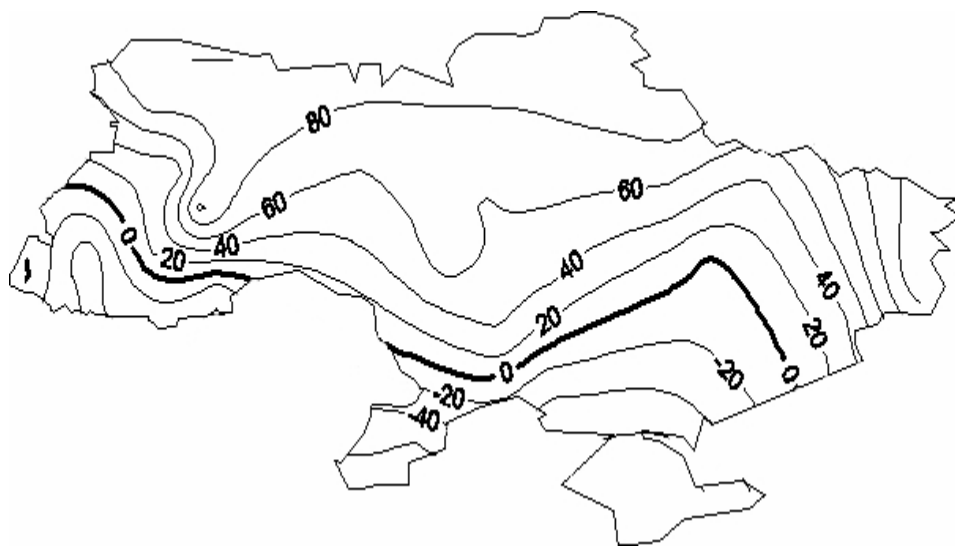


Рис. 8.6. Просторовий розподіл відносних відхилень норм річного кліматичного стоку за період 2031-2050 рр. у порівнянні із даними до 1989 р. (сценарій А2)

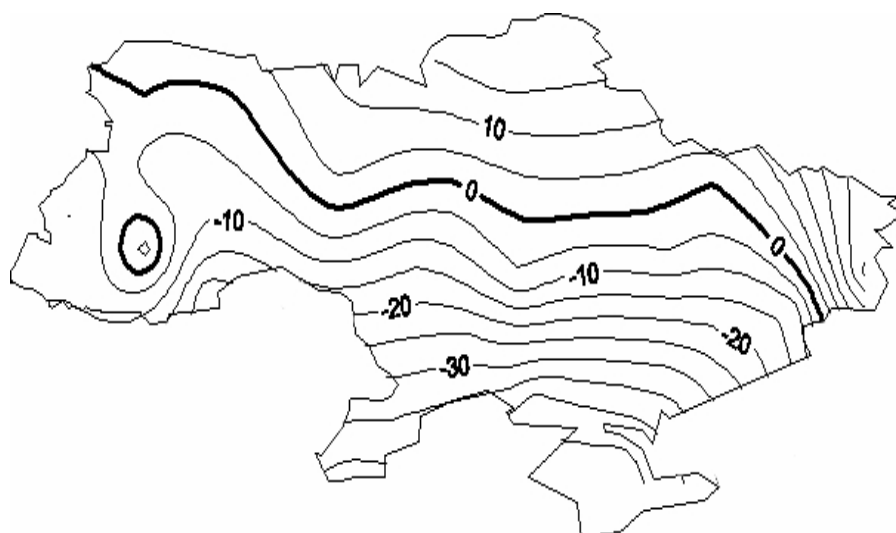


Рис. 8.7. Просторовий розподіл відносних відхилень норм річного кліматичного стоку за період 2031-2050 рр. у порівнянні із періодом 2011-2030 рр. (сценарій А2)

Стосовно внутрішньорічного розподілу стоку, то суттєвих його змін за сценарієм А2 не передбачається (табл. 8.1, 8.2). Для усіх географічних зон України, окрім зони степу, передбачається зростання внеску у річний стік весняного сезону (до 9,9%) за рахунок зменшення стоку в літній сезон (до 8,3%).

Таблиця 8.1 - Зміни внутрішньорічного розподілу стоку (%) за період 2011-2030 рр. у порівнянні із періодом 1986-2005 рр. (сценарій А2)

Географічна зона	Сезони			
	Зима XII-II	Весна III-V	Літо VI-IX	Осінь X-XI
Гірська зона Українських Карпат	0,7	1,5	-2,3	0,0
Зона мішаних лісів	1,0	2,7	-3,4	-0,2
Зона лісостепу	-0,3	6,6	-6,3	0
Зона степу	0,4	-3,4	1,8	1,3

Таблиця 8.2 - Зміни внутрішньорічного розподілу стоку (%) за період 2031-2050 рр. у порівнянні із періодом 1986-2005 рр. (сценарій А2)

Географічна зона	Сезони			
	Зима XII-II	Весна III-V	Літо VI-IX	Осінь X-XI
Гірська зона Українських Карпат	-0,3	3,3	-2,9	-0,2
Зона мішаних лісів	0,1	4,6	-4,3	-0,3
Зона лісостепу	-1,2	9,9	-8,3	-0,4
Зона степу	1,3	-1,1	-1,6	1,4

Контрольні запитання

1. Як зміниться показник β_X до середини XXI сторіччя за сценарієм глобального потепління А2?
2. Що буде відбуватися із водними ресурсами України за сценарієм А2 у періоди 2011-2030 рр., 2031-2050 рр.?
3. Які зміни внутрішньорічного розподілу стоку передбачаються за сценарієм А2?

РОЗДІЛ 9
ОЦІНКА ВОДНИХ РЕСУРСІВ РІЧОК ВОДОЗБОРУ
ТИЛІГУЛЬСЬКОГО ЛИМАНУ ЗА ДАНИМИ СЦЕНАРІЮ А1В НА
ОСНОВІ МОДЕЛІ “КЛІМАТ –СТІК”

Для оцінки наслідків глобального потепління із 15 запропонованих сценаріїв ВМО у межах гілки сценаріїв А1В (сценарна родина А1, модель – REMO, розробник МРІ) було обрано сценарій М10 як найбільш адекватний фактичним даним гідрометеорологічних спостережень за період 1998-2007 рр.

Для аналізу змін основних кліматичних чинників формування стоку на основі обраного сценарію глобального потепління у межах басейну річки Тилігул були виділені 5 точок, розташованих у вузлах сітки з кроком 25 км (рис. 9.1). У цих точках досліджувався вже існуючий та можливий хід гідрометеорологічних характеристик за періоди 1971-2000, 2001-2041, 2041-2070, 2071-2098 рр. [2].

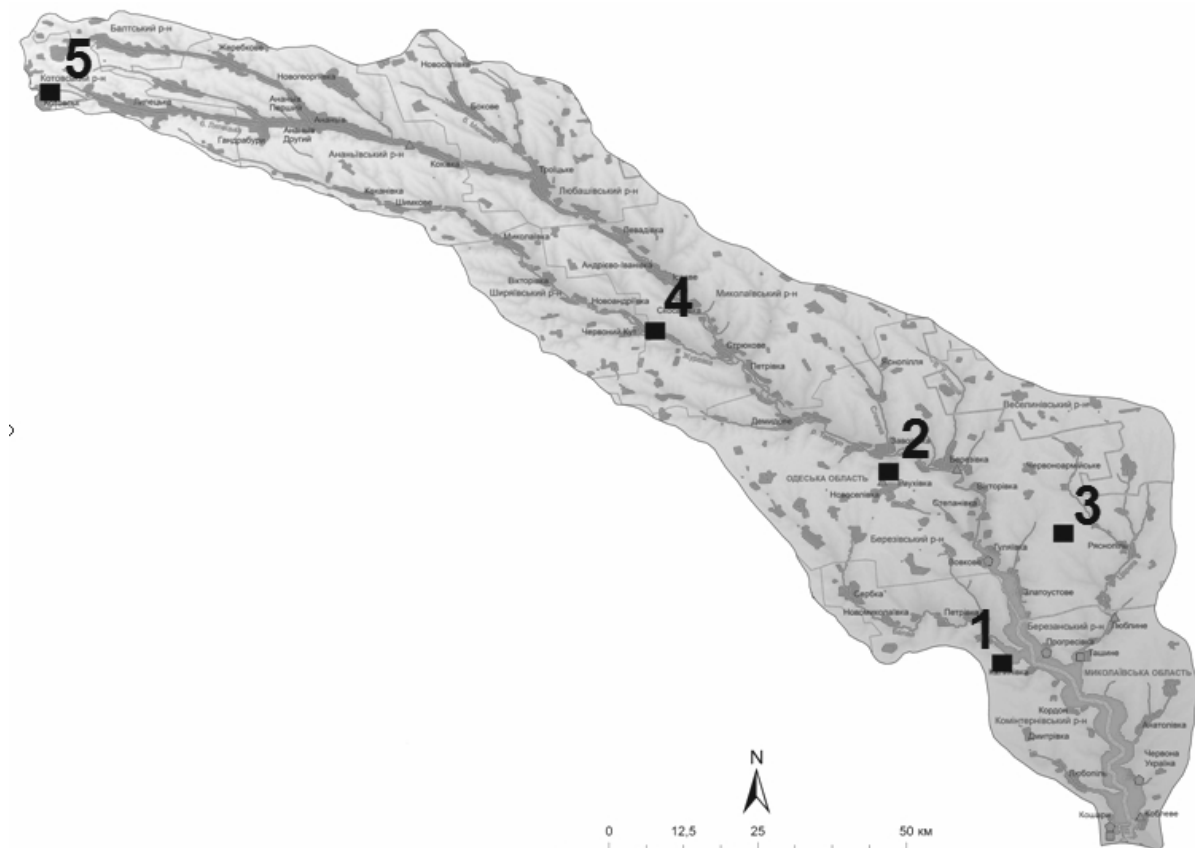


Рис. 9.1. Карта розташування вузлових точок на території водозбору Тилігульського лиману

Для 5-ти точок, які знаходяться у межах водозбору Тилігульського лиману, були визначені середні багаторічні характеристики кліматичних чинників та річного кліматичного стоку (табл. 9.1) на основі даних сценарію М10. Установлено, що зміни кожної із досліджуваних гідрометеорологічних характеристик відбуваються синхронно у кожній із точок.

Таблиця 9.1 – Кліматичні чинники та кліматичний стік в басейні Тилігульського лиману

Точка	Період	\bar{X} , мм	\bar{E}_m , мм	β_H	\bar{Y}_K , мм
1	1971-2000	477	980	0,49	17
	2001-2040	433	1049	0,41	9,7
	2041-2070	486	1106	0,44	13
	2071-2098	461	1205	0,38	8,2
2	1971-2000	500	989	0,51	20
	2001-2040	459	1059	0,43	11,8
	2041-2070	517	1110	0,47	16
	2071-2098	492	1213	0,41	10
3	1971-2000	487	992	0,49	18
	2001-2040	432	1050	0,41	9,5
	2041-2070	497	1111	0,45	14
	2071-2098	480	1209	0,40	9,6
4	1971-2000	490	985	0,50	19
	2001-2040	460	1051	0,44	12,1
	2041-2070	509	1105	0,46	16
	2071-2098	478	1209	0,40	9,5
5	1971-2000	514	977	0,53	23
	2001-2040	486	1041	0,47	15,5
	2041-2070	520	1097	0,47	17
	2071-2098	489	1200	0,41	11

Аналіз розподілу кліматичних чинників формування річного стоку в межах усього водозбору Тилігульського лиману (табл. 9.2) показав сталу тенденцію до зростання теплоенергетичних ресурсів клімату протягом XXI сторіччя. Що стосується опадів, то згідно із даними сценарію М10 їх середня багаторічна величина зменшиться на 7% у 2001-2040 рр. та дещо зросте у 2041-2070 рр. (+2,6%) при порівнянні із періодом 1971-2000 рр.

Таблиця 9.2 – Зміна кліматичних чинників формування стоку у басейні Тилігульського лиману

Період	\bar{X} , мм	\bar{E}_m , мм	β_X
1971-2000	493	984	0,50
2001-2040	454	1050	0,43
2041-2070	506	1106	0,46
2071-2098	480	1207	0,40

Як випливає з табл. 9.2, на території водозбору Тилігульського лиману у XXI сторіччі відбудеться перехід від зони недостатнього зволоження до напіваридної, аридність клімату до кінця XXI сторіччя буде посилюватися.

В результаті просторово-часового узагальнення отриманих у вузлах сітки вхідних даних сценарію M10, були виконані оцінки кліматичних чинників та характеристик кліматичного, природного та побутового річного стоку водотоків басейну Тилігульського лиману згідно із методиками розрахунків за моделлю “клімат-стік”, описаними у попередніх розділах. Характеристики побутового стоку визначалися, виходячи з припущення, що масштаби водогосподарської діяльності у вигляді регулювання стоку штучними водоймами відповідають сучасному їх стану.

Слід зазначити, що період з 1971 по 2000 рр. включає до себе десятиріччя, коли вплив змін клімату на стік річок України став суттєвим (1989-2000). Для того, щоб оцінити наслідки глобального потепління при оцінці водних ресурсів водозбору Тилігульського лиману доцільно виконувати порівняння розрахованих за сценарієм оцінок водних ресурсів з даними до 1989 р., оскільки 1989 р. є “переломним” й відповідає початку суттєвих змін клімату на території України. На основі моделі “клімат-стік” були визначені об’єми припливу прісних вод до Тилігульського лиману у природних (табл. 9.3) та порушених (табл. 9.4) водогосподарською діяльністю умовах, які відповідають періоду 1989 р. та після.

Установлено, що за сценарієм глобального потепління M10 приплив прісних вод зі стоком річок, режим яких непорушений водогосподарською діяльністю, буде зменшуватися в усі розглянуті розрахункові періоди при порівнянні із періодом до 1989 р. (табл. 9.5). У період 2001-2040 рр. очікується зменшення природних водних ресурсів на 48%. За рахунок збільшення опадів у 2041-2070 рр. процес руйнації водних ресурсів дещо загальмується і зниження буде становити 38%, проте, у подальшому знов розвиватиметься. У період 2071-2098 рр. водні ресурси зменшаться до 60%. При збереженні сучасної ситуації із штучними водоймами у 2001-2040 рр. надходження прісних вод від водотоків до Тилігульського лиману

в умовах глобального потепління при порівнянні із даними до 1989 р. зменшиться на 75%; у 2041-2070 рр. - на 66%; у 2071-2098 рр. на 84% .

Таблиця 9.3 – Зміни річного припливу прісних вод до Тилігульського лиману у природних умовах у різні часові інтервали

Річка	Приплив прісних вод \overline{W}_{PP} , млн м ³			
	до початку впливу глобального потепління (до 1989 р.)	2001-2040 рр.	2041-2070рр.	2071-2098рр.
Тилігул	46,0	24,1	28,4	17,8
Царега	3,9	1,91	2,63	1,97
Балайчук (Балай)	4,1	1,93	2,34	1,76
Хуторська	0,46	0,220	0,272	0,172
Боковий приплив	1,6	0,890	1,09	0,698
Сума	56	29,0	34,7	22,4

Таблиця 9.4 – Зміни річного припливу прісних вод до Тилігульського лиману у різні часові інтервали при наявності на його водозборі штучних водойм

Річка	Приплив прісних вод за різні розрахункові періоди \overline{W}_{POB} , млн м ³			
	до початку впливу глобального потепління (до 1989р.)	2001-2040рр.	2041-2070рр.	2071-2098рр.
Тилігул	33,0	12,0	16,5	8,37
Царега	1,91	0,573	0,74	0,11
Балайчук (Балай)	2,75	0,64	1,05	0,47
Хуторська	0,00	0,00	0,00	0,00
Боковий приплив	1,06	0,36	0,545	0,175
Сума	38,7	13,6	18,8	9,12

Таблиця 9.5 - Зміни водних ресурсів річок басейну Тилігульського лиману під впливом водогосподарської діяльності та глобального потепління (сценарій М10)

Умови формування стоку	Зміни водних ресурсів у різні розрахункові періоди, %			
	до 1989р.	2001-2040рр.	2041-2070рр.	2071-2098рр.
Під дією глобального потепління	0,0	-48,2	-38,0	-60,0
Під дією водогосподарських перетворень та глобального потепління	-30,9	-75,1	-66,4	-83,7

Визначення статистичних параметрів річного стоку за моделлю “клімат-стік” дозволяє установити його характеристики у роки різної водності. До кінця ХХІ сторіччя наслідки змін глобального клімату, визначені за моделлю “клімат-стік” з використанням даних сценарію М10, будуть такими, що водні ресурси річок Царега, Балайчук будуть безповоротно зруйновані, а стік від річки Тилігул надходитиме до Тилігульського лиману лише у багатоводні роки (табл. 9.6).

Таблиця 9.6 – Характеристики природного та побутового річного стоку (об’єми) у роки різної водності (2071-2098 рр., сценарій М10)

Річка	Статистичні параметри природного річного стоку			Річний стік заданої забезпеченості, млн м ³					
	\bar{W} , млн м ³	C_V	C_S	$W_{1\%}$	$W_{5\%}$	$W_{25\%}$	$W_{50\%}$	$W_{75\%}$	$W_{95\%}$
Тилігул (в умовах глобального потепління)	17,8	2,26	3,86	191	95,2	18,9	1,03	0,00	0,00
Тилігул (в умовах глобального потепління та водогосподарської діяльності)	8,37	3,58	6,08	150	24,3	3,88	0,00	0,00	0,00

Контрольні запитання

1. Який крок сітки у сценаріїв А1В, в т.ч. М10??
2. Як будуть змінюватися опади, максимально можливе випаровування, показник β_X на території водозбору Тилігульського лиману у різні часові інтервали за сценарієм М10?
3. Опишіть зміну припливу прісних вод до Тилігульського лиману за сценарієм М10?

ЛІТЕРАТУРА

1. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья / Под ред. Ю.С. Тучковенко, Е.Д. Гопченко. – Одесса: ТЭС, 2012. – 223 с.
2. Водні ресурси та гідроекологічний стан Тилігульського лиману: Колективна монографія / Під ред. Ю.С. Тучковенко, Н.С. Лободи. – Одеса: ТЕС, 2014. – 276 с.
3. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). – К.: Ніка-центр, 2010. – 316 с.
4. Гопченко Е.Д., Лобода Н.С. Водные ресурсы северо-западного Причерноморья (в естественных и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях). – Київ: КНТ, 2005. – 188 с.
5. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С., Овчарук В.А. Гідрологічні розрахунки: підручник. – Одеса: ТЕС, 2014. – 484с.
6. Лобода Н.С., Гопченко Є.Д. Стохастичні моделі у гідрологічних розрахунках: Навчальний посібник. – Одеса: Екологія, 2006. – 200 с.
7. Лобода Н.С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния. – Одесса: Экология, 2005. – 208 с.
8. Лобода Н.С., Сербова З.Ф., Божок Ю.В. Вплив змін клімату на водні ресурси України у сучасних та майбутніх умовах (за сценарієм глобального потепління А1В // Український гідрометеорологічний журнал. – 2014. – Вип. 15. – С. 149-159.
9. Лобода Н.С., Сербова З.Ф., Божок Ю.В. Оцінка впливу змін клімату на водні ресурси України на основі моделі «клімат-стік» за сценарієм глобального потепління А2 // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2015. – Т.1(36). – С.8-17.
10. Мезенцев В.С., Карнацевич И.В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 75 с.
11. Режимы влагообеспеченности и условия гидромелиораций степного края / Мезенцев В.С., Карнацевич И.В., Белоненко Г.В., Плотников Ю.Н., Полисадов С.Д. (Под ред. В.С.Мезенцева). – М.: Колос, 1974. - 240 с.
12. Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України / Під ред. Степаненко С.М., Польового А.М. – Одеса: Екологія, 2011. – С. 566-605.
13. Україна та глобальний парниковий ефект. Вразливість і адаптація екологічних та економічних систем до зміни клімату. За редакцією В.В. Васильченка, М.В. Рапцуна, І.В. Трофімової. – Т.2. – К.: Агентство з раціонального використання енергії та екології, 1998. – 206 с.

ТЕРМІНИ

АНТРОПОГЕННИЙ ВПЛИВ – прямий та опосередкований вплив людства на навколишнє середовище і його компоненти внаслідок господарської діяльності.

ВОДНЕ ГОСПОДАРСТВО – галузь економіки, яка розробляє і здійснює заходи щодо використання поверхневих і підземних вод для різних галузей економіки, а також здійснює охорону вод і боротьбу з їх шкідливою дією.

ВОДНІ РЕСУРСИ – природні запаси вод річок, озер, боліт, водосховищ, льодовиків, морів і океанів, а також запаси підземних вод певної території, які використовуються або їх можна буде використовувати для потреб населення і різних галузей господарства.

ВОДНІСТЬ РІЧКИ – кількість води, що несе річка за певний період часу (кілька років, рік, місяць, декаду, сезон). Залежить від фізико-географічних умов території, здебільшого від кліматичних (кількість опадів) та орографічних (форма рельєфу) факторів.

ЗМІНА КЛІМАТУ – це 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 поодинокі екстремальні погодні явища).

КЛІМАТ – це багаторічний режим погоди, характерний для певної місцевості. Клімат залежить від географічної широти певної території, відстані від морів та океанів, характеру морських течій, висоти над рівнем моря, особливостей рельєфу.

КЛІМАТИЧНИЙ СТІК – стік, зумовлений кліматичними чинниками та розрахований за метеорологічними даними.

КОЕФІЦІЄНТ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ на норму річного стоку – відношення норми побутового стоку до норми природного.

МАКСИМАЛЬНО МОЖЛИВЕ ВИПАРОВУВАННЯ – являє собою шар води, який міг би випаритися з поверхні суші, якби на процес випаровування були витрачені усі теплоенергетичні ресурси клімату.

МОДЕЛЬ “КЛІМАТ-СТІК” – модель, розроблена в Одеському державному екологічному університеті, яка дозволяє виконувати оцінку стану водних ресурсів за метеорологічними характеристиками, включаючи дані кліматичних сценаріїв змін глобального клімату.

НОРМА РІЧНОГО СТОКУ – це його середня величина, розрахована за багаторічний період із незмінними ландшафтними, географічними умовами, які відносяться до сучасної геологічної епохи та характеризуються однаковим рівнем господарського освоєння річки.

ПІВНІЧНО-АТЛАНТИЧНЕ КОЛИВАННЯ (ПАК) – мінливість клімату на півночі Атлантичного океану, що проявляється перш за все у зміні температури морської поверхні.

ПОБУТОВИЙ СТІК – порушений водогосподарською діяльністю стік.

ПОКАЗНИК ЗВОЛОЖЕННЯ (ПОСУШЛИВОСТІ) – відношення річної кількості опадів до випаровуваності за той самий період. Чим показник більший, тим клімат вологіший, а чим менший – тим сухіший.

ПОСУХА – тривала (багатоденна, багатомісячна, багаторічна) суха погода з підвищеною температурою повітря, з відсутністю або незначною кількістю опадів. Це призводить до виснаження вологи в ґрунті, пересихання водойм.

ПРИРОДНИЙ СТІК – непорушений водогосподарською діяльністю стік.

РЕЖИМ РІЧКИ – закономірна зміна стану річки за часом, яка залежить в першу чергу від кліматичних умов. Виявляється у вигляді коливань рівнів та витрат води.

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ (ІМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ) – математична модель, в якій параметри, умови функціонування і характеристики стану об'єкта, що моделюється, представлені випадковими величинами і пов'язані стохастичними (випадковими, нерегулярними) залежностями

СЦЕНАРІЇ ЗМІНИ КЛІМАТУ – правдоподібні і в багатьох випадках спрощені описи можливого майбутнього, засновані на низці взаємно узгоджених припущень; система робочих гіпотез щодо можливого розвитку суспільства і наслідків цього розвитку для клімату.

Навчальне електронне видання

ЛОБОДА Н. С.

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 5242 від 08.11.2016