

© О.М. Назаренко¹, А.О. Березовська¹, Є.І. Буякова¹, А.В. Башкіров¹, Є.А. Шерстюк²

¹Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КЛІМАТУ ТА ТЕХНОГЕНЕЗУ НА СТАН ВОДНИХ РЕСУРСІВ ПІВДЕННИХ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ

© O. Nazarenko¹, A. Berezovska¹, Ye. Buyakova¹, A. Bashkirov¹, Ye. Sherstiuk²

¹National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

DETERMINATION OF CLIMATE AND TECHNOGENESIS IMPACT ON THE STATE OF WATER RESOURCES IN THE SOUTHERN REGIONS OF UKRAINE

Метою дослідження є розробка математичних моделей впливу кліматичних змін та техногенного забруднення на водний баланс річкових басейнів для прогнозування дефіциту води, оцінки ефективності екологічних заходів та впровадження інноваційних технологій у відновленні водних ресурсів півдня України.

Методика досліджень. Дослідження базується на статистичному аналізі багаторічних спостережень за кліматичними та гідрологічними показниками басейнів річок в південних регіонах України. Для збору даних використані дані батиметричних датчиків, встановлених у каналах для моніторингу рівня води, вологості ґрунтів, кількості опадів та змін у водному балансі; датчиків вологості ґрунту на різних глибинах з триразовим контролем критичних літніх температур; метеорологічні дані – щодо кількості опадів, температурних режимів і тривалості посушливих періодів – отримані з місцевих метеостанцій.

Результати досліджень. Проведені дослідження показали стійку тенденцію зменшення обсягів вологи у повітрі та в ґрунті в умовах підвищених температур південних регіонів України, що створює ризики для технологічних процесів та аграрного сектору. На основі виконаних оцінок запропоновані ефективні методи інтегрованого регулювання водних ресурсів для мінімізації наслідків посух у південних регіонах України.

Наукова новизна. Вперше розроблено інтегральний індекс відновлення водності для південних регіонів України, який враховує як кліматичні, так і техногенні фактори. Проведено математичне моделювання впливу посухи на водний баланс водойм. Запропоновано методологію оцінки впливу кількості атмосферних опадів на водний режим у різних кліматичних зонах. Розроблено рекомендації щодо використання локальних технологій очищення стічних вод у періоди дефіциту води.

Практичне значення. Результати можуть бути використані для управління водними ресурсами у південних регіонах України, зокрема в умовах посух. Дослідження формує інструментарій для відновлення водного балансу водного господарства в умовах зміни клімату, що є важливим для забезпечення сталості екосистем та економіки регіону.

Ключові слова: водні ресурси, кліматичні зміни, посуха, гідравлічне регулювання, водний баланс, екологічні індикатори.

Вступ. Зміни клімату стають все більш очевидними у багатьох регіонах світу, і Україна не є винятком. Одним із найбільш значних наслідків цих змін є

частіші та інтенсивніші періоди посух, особливо в південних регіонах країни. Посуха не лише знижує кількість доступної води, але й негативно впливає на продуктивність сільського господарства, що є критично важливим для економіки цих регіонів. З огляду на це, забезпечення ефективного регулювання водних ресурсів у посушливі періоди стає надзвичайно важливим.

Посухи в Україні (Запорізька, Херсонська та Дніпропетровська областях) набувають усе більшого масштабу. Такі явища в умовах зменшення кількості атмосферних опадів призводять до зниження рівня підземних вод, і скорочення доступності водних ресурсів для сільського господарства, промисловості та комунальних потреб. Крім того, техногенні фактори, такі як забруднення водних джерел і недосконале управління водними ресурсами, лише посилюють негативний вплив природних змін на водний баланс водойм. У зв'язку з цим актуальною є розробка нових підходів для гнучкого регулювання водними ресурсами в умовах посухи. Одним із таких підходів є використання математичних моделей для прогнозування водного балансу та дефіциту вологи на основі кліматичних та гідрологічних даних. Моделювання може надати можливість точніше оцінювати вплив кліматичних змін та техногенних факторів на стан водних ресурси, а також розробляти стратегії для відновлення водного балансу в регіонах, що страждають від посух.

Основна частина. Кліматичні фактори вивчаються в багатьох наукових роботах, де дослідники аналізують вплив температурних аномалій та дефіциту атмосферних опадів на водний баланс регіонів. Наприклад, у роботі [1] розглядаються тривалі періоди посухи в Україні та методи адаптації до них. Автори демонструють використання математичних моделей для прогнозування водного дефіциту та розробки стратегії управління водними ресурсами. Дослідження також показало значний вплив посухи на різні типи водойм. Інші роботи [2], зосереджені на розробці гідрологічних моделей, які враховують вплив температури повітря на водні ресурси України. Дослідники пропонують використовувати спеціальні індекси для оцінки інтенсивності та тривалості посухи, такі як індекс посухи Палмера (PDSI) і стандартний індекс опадів (SPI). Їх результати показують, що ці індекси можуть бути ефективними інструментами для оцінки рівня ризику посух у певних регіонах та їх впливу на водний баланс.

На міжнародному рівні науковці [3, 4], акцентують увагу на необхідності інтегрованих систем управління водними ресурсами, які враховують не тільки кліматичні зміни, а й техногенні фактори. У роботі [3] пропонуються технології очищення та повторного використання стічних вод для мінімізації наслідків посухи. Звертається також увага на важливість розвитку інфраструктури для зберігання та перерозподілу водних ресурсів у посушливих регіонах [4]. Техногенне навантаження також є важливою складовою сучасних досліджень. В роботі [5] аналізується вплив промислових відходів на якість води у водоймах південних регіонів України. Дослідження виявили, що високі рівні забруднення у поєднанні з дефіцитом води підсилюють негативні наслідки посух [6, 7], що вимагає застосування комплексних підходів для відновлення водних ресурсів.

Таким чином, аналіз останніх досліджень показує, що глобальні і локальні підходи до вирішення проблеми посух та водного дефіциту зосереджуються на таких аспектах: розробка математичних моделей для прогнозування та управління водними ресурсами в умовах посухи; використання індексів, таких як SPI та PDSI, оцінки тривалості та інтенсивності посух; розробка інтегрованих підходів до управління водними ресурсами; використання технологій очищення та повторного використання води в умовах дефіциту вологості.

Для збору даних щодо рівня вологості ґрунтів, кількості опадів і стану ґрунтів було встановлено батиметричні датчики у водопостачальних каналах. Процес збору даних включав вимірювання вологості ґрунту на різних глибинах (10, 25, 50, 100 см) з триразовим контролем протягом дня (08:00, 16:00, 22:00). Окрім того, було використано індекс продуктивності ґрунтів для аналізу врожайності місцевих фермерських господарств.

Для оцінки дефіциту вологості в роботі було використано математичне моделювання. Під час моделювання було застосовано рівняння регресії третього порядку для побудови прогнозу водного балансу та оцінки впливу різних кліматичних факторів на рівень водних ресурсів. Враховувалися періоди посух, які визначалися за кількістю днів з дефіцитом вологості. Моделювання показало високий рівень точності (понад 96%), що дозволило дослідникам скласти прогноз тривалості посушливих періодів та їх впливу на сільське господарство та екосистеми. У ході аналізу було також виявлено взаємозв'язок між тривалістю періодів посух та рівнем продуктивності ґрунтів.

Інтегральний індекс відновлення водності базувався на поєднанні кліматичних, техногенних та екологічних факторів, що впливають на водний баланс. На основі аналізу даних за кілька років було створено моделі, які враховують вплив опадів, температури та рівня забруднення води на відновлення водності регіону. Отримані результати свідчать про те, що в умовах зростання кліматичних ризиків, таких як посухи, необхідно впроваджувати комплексні заходи для стабілізації водного балансу.

Дослідження впливу кліматичних змін та техногенного навантаження на водні ресурси південних регіонів України було проведено через серію експериментів. Метою було визначення дефіциту вологості ґрунтів та оцінка його впливу на живлення водного режиму водойм. Для цього використовували методи вимірювання вологості ґрунтів, аналізу хімічних показників води, а також математичне моделювання кліматичних процесів.

Заміри вологості ґрунтів проводилися на глибинах 5, 10, 25, 40 см від поверхні. Вимірювання здійснювалися за допомогою пристрою Vorell 89000, що дозволяє фіксувати показники вологості, кислотності, температури ґрунту та рівня освітлення. Замірювання проводилися в характерних перетинах водоймищ, де перетинаються поверхневі та стічні води. Експрес-тести жорсткості, лужності та вмісту солей у воді допомагали фіксувати індикаторні властивості стоків у польових умовах. Залежно від обсягу дощових вод (1...75 л/с), заміри здійснювалися кожні 10 хвилин. Усі дані заносилися до польового журналу з обов'язковою фіксацією місця, часу дослідження та результатів вимірювання.

Після збору даних вони були оброблені статистично, що дало змогу створити матрицю планування експерименту. Для цього враховувалися основні фактори впливу (X_1 – температура, X_2 – жорсткість, X_3 – вміст солей) та параметр оптимізації (Y – остаточна вологість ґрунту). За допомогою рівнянь регресії третього порядку було побудовано математичні моделі, які дозволили графічно інтерпретувати результат. Ізозначення, отримані з цих моделей, ілюстрували залежність вологості ґрунтів від впливу зовнішніх факторів.

На основі даних про опади (табл. 1) було проведено аналіз трирічних ковзних середніх показників для Запоріжжя, Херсона і Дніпра. Як показано в табл. 2, трирічні середні значення демонструють поступове зменшення кількості опадів протягом періоду дослідження. Для Херсона ковзні середні значення за останні роки показують найнижчі рівні опадів, що свідчить про значний вплив кліматичних змін на цей регіон.

Таблиця 1

Кількість середніх опадів по регіонах
(Запорізька, Херсонська, Дніпропетровська області)

Рік	Середні опади регіон А (мм)	Середні опади регіону В (мм)	Середні опади регіону С (мм)
2010	640	230	415
2011	456	127	217
2012	236	261	376
2013	456	301	431
2014	235	261	417
2015	601	322	472
2016	532	400	523
2017	731	223	365
2018	256	128	187
Поточний	541	112	356

Таблиця 2

Трирічне рухоме середнє для регіонів

Рік	Трирічне середнє руху для регіону А	Трирічне середнє руху для регіону В	Трирічне середнє руху для регіону С
2010	-	-	-
2011	-	-	-
2012	444	206	657
2013	383	228	427
2014	309	274	386
2015	432	295	418
2016	456	327	489
2017	621	315	378
2018	506	250	312
Поточний	509	154	265

Результати графічного аналізу (рис. 1 та рис. 2) показують наявність дво- і трирічних періодів посухи, що значно впливає на водний режим водойм і призводить до зниження рівня води в річках та озерах.

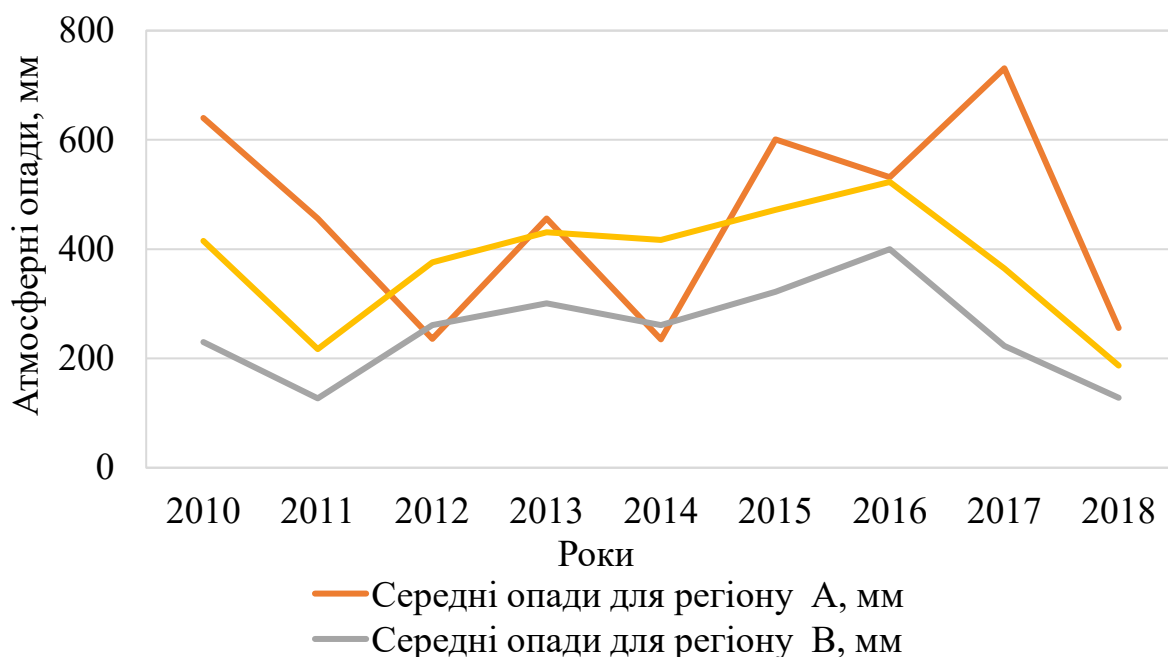


Рис. 1. Довгострокова середніх опадів по регіонах

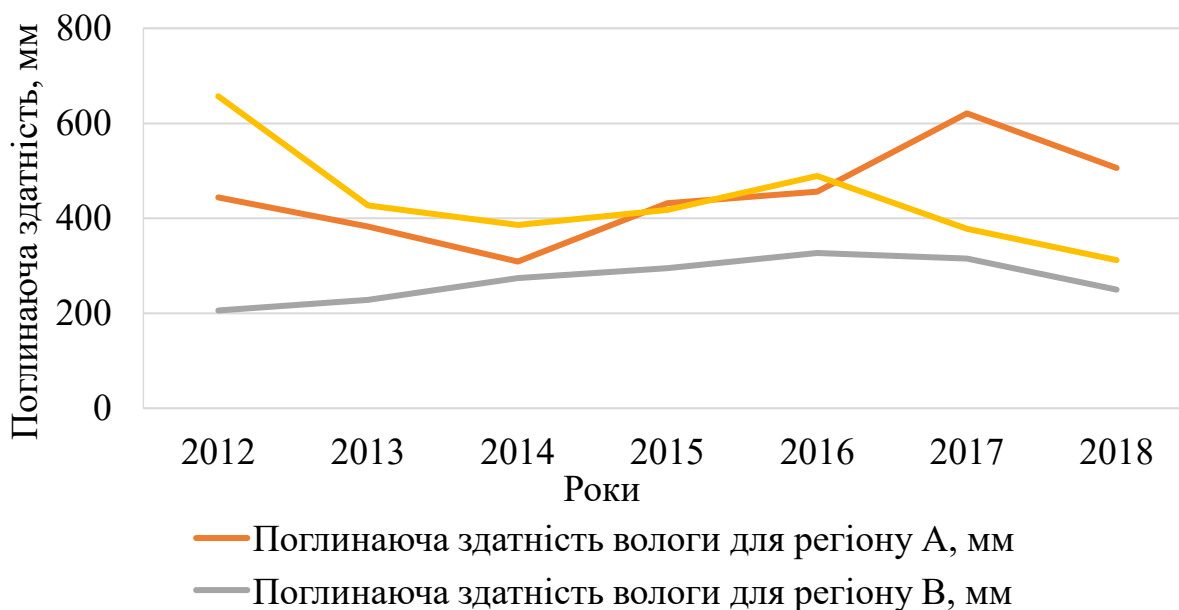


Рис. 2. Довгострокова середня поглинаючої здатності вологості по регіонах

Посуха та зменшення кількості опадів призводять до значного дефіциту води в ґрунті та водоймах. Це особливо помітно у вузьких річкових потоках і водоймах, де рівень води може досягати критично низьких позначок. Відсутність опадів протягом тривалих періодів викликає накопичення дефіциту вологості, що впливає на гідрологічний режим річок, озер та водосховищ, а також на стан

підземних вод. У дослідженні ефективної кількості опадів для південних регіонів України було розроблено формули для розрахунку щомісячної ефективної кількості опадів на кожний регіон. Вони допомагають оцінити обсяги води, які фактично надходять до ґрунту і можуть бути використані для підтримки водного режиму, враховуючи різні умови клімату та техногенезу.

Кількість ефективних опадів (ефективне використання опадів ЕВО), мм, визначається:

$$\text{ЕВО}_{in} = M_{i,n} + W_i \times (ED_{i-1,n} - M_{i-1}), (n = 1, \dots, NY), (i = 1 \dots 12) \quad (1)$$

$$\text{ЕВО}_{in} = \underline{M}_i \quad (2)$$

$$W_i = C \quad 1 + \frac{M_i}{\frac{1}{12 \times 31}} \quad (3)$$

де n – ефективна кількість опадів в n місяці та році; $M_{i,n}$ – кількість опадів в n -місяці i року; $\underline{M}_i$ – довгострокове щомісячне середнє значення за місяць i ($i = 1, \dots, 12$); W_i – ваговий коефіцієнт за місяць i ; NY – кількість років без дощу; C – константа, яка визначається випробуванням (0,1); 31 – дефіцит вологи, мм.

Формула (1) враховує як кількість опадів, так і накопичений дефіцит вологи від попередніх місяців. Для кожного місяця здійснюється зважування на основі даних про опади, що дозволяє більш точно прогнозувати наявність водних ресурсів у періоди посухи.

Після обчислення ефективної кількості опадів отримані дані використовуються для оцінки загального водного балансу в регіоні. Ці показники допомагають визначити місяці, коли водний дефіцит досягає критичних рівнів і необхідні додаткові заходи для збереження води у водоймах та забезпечення зрошення територій. Ефективна кількість опадів є одним із ключових показників для розробки заходів щодо подолання наслідків посухи. Результати математичного моделювання для південних регіонів України показують, що середня ефективна кількість опадів становить значно менше за фактичні опади в умовах тривалих посушливих періодів. Для Дніпровського регіону середньомісячна кількість опадів за період 1997–2017 рр. становила 53 мм, тоді як ефективна кількість – лише 27 мм. Це свідчить про те, що більше половини опадів втрачається через випаровування та інші кліматичні процеси.

Поряд з кліматичними змінами, техногенні фактори також суттєво впливають на стан водних ресурсів у південних регіонах України. До основних техногенних впливів належать забруднення водойм промисловими стоками, використання води для промислових і сільськогосподарських потреб без відповідного очищення, а також зміни в ландшафті через забудову та сільськогосподарську діяльність. Промислові підприємства в містах, таких як Запоріжжя та Дніпро, збільшують навантаження на природні водойми, що призводить до погіршення якості води та її дефіциту в періоди посухи.

Для оцінки техногенного навантаження було проведено серію польових досліджень та аналізів хімічного складу води у водоймах. У ході досліджень були виявлені високі рівні забруднення води важкими металами, нафтопродуктами та

органічними сполуками, які надходять до водойм з промисловими стоками. Концентрації забруднення особливо посилюється в періоди, коли рівень води знижується через дефіцит опадів, що зменшує можливість природного очищення води. Техногенне навантаження визначалося також через вплив стічних вод на водний баланс водоймища. В регіонах з високою концентрацією промислових підприємств рівень забруднення води значно перевищує гранично допустимі концентрації, що погіршує стан місцевих водних ресурсів. За результатами проведених досліджень, було встановлено, що в деяких регіонах рівень забруднення перевищував норми в 2–3 рази. Для зменшення впливу техногенних факторів на водний режим водойм пропонуються наступні заходи:

- використання технологій локальної кавітаційної обробки стічних вод, що дозволяє очистити воду до рівня, придатного для зрошення;
- впровадження сучасних систем фільтрації та утилізації промислових стоків;
- підвищення контролю за промисловими підприємствами щодо скидання стічних вод у водойми;
- створення рекреаційних зон навколо водойм для зменшення забруднення через поверхневий стік з сільськогосподарських земель.

Запропоновані заходи дозволяють не лише покращити якість води у водоймах, але й підвищити ефективність використання водних ресурсів у посушливі періоди. Одним з пунктів роботи є визначення формули для розрахунку періоду посухи. Розрахунок періоду посухи базується на оцінці дефіциту опадів у певний проміжок часу та їх співвідношенні із середніми багаторічними показниками. У дослідженні використовується ковзна шкала для оцінки 12 місячних значень опадів, які допомагають визначити тривалість періоду посухи.

Основна формула для розрахунку періоду засухи (T_3) виглядає наступним чином:

$$T_3 = \frac{\sum_j RDj \times D}{\sum_D RDd}, \quad (4)$$

де d – індекс посухи; j – місяці надмірного дефіциту опадів в посушливий період d ; D – тривалість посухи (місяць); RDj – дефіцит надмірних опадів спостерігається в місяці j ; RDd – середній дефіцит кожен місяць періоду d .

Показники допомагають більш точно визначити періоди, коли дефіцит вологи досягає критичних значень і може призвести до негативних наслідків для сільськогосподарських угідь і природних екосистем.

Висновки. За результатами дослідження впливу кліматичних змін та техногенних факторів на водний режим водоймищ південних регіонів України в умовах тривалих посух розроблені основні критеріальні підходи до оцінки діючих факторів:

- дефіцит опадів: аналіз даних за період 2014–2019 років показав, що для Херсона, Дніпра та Запоріжжя дефіцит опадів досягає критичних рівнів – 256 мм, 184 мм та 211 мм відповідно;

– техногенне навантаження: рівень забруднення води у водоймах промислових районів, зокрема через промислові стоки, атмосферні викиди суттєво збільшується під час посушливих періодів; проведені польові дослідження показали перевищення допустимих концентрацій забруднюючих речовин у 2–3 рази;

– інтегральний індекс відновлення водності: запропонований індекс є дієвим інструментом для оцінки ефективності відновлювальних заходів, що враховують кліматичні і техногенні фактори; використання цього індексу дозволить оптимізувати водне господарство в умовах тривалих посух і зменшити наслідки кліматичних змін.

Перелік посилань

1. Ковальов, О., & Гриценко, І. (2018). Використання математичних моделей для прогнозування водного дефіциту та адаптації до посух в Україні. Екологія.
2. Бойко, І. (2020). Розробка гідрологічних моделей з урахуванням впливу посухи на водні ресурси України. Інститут гідротехніки. Академія.
3. Tsakiris, J.P., & Louks, D.P. (2023). Adaptive Water Resources Management Under Climate Change: An Introduction. *Water Resources Management*, 37, 2221–2233. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03518-9>
4. Fulco, L. (2014) Climate change adaptation and Integrated Water Resource Management in the water sector. *Journal of Hydrology*, 518, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.010>
5. Назаренко, О.М., & Рябенко, І.В. (2021). Вплив промислових відходів на якість води у водоймах південних регіонів України. Рівне. *Збірник наукових праць НУВГП*, (5), 123–132.
6. Poplavska, V.V., & Nazarenko, O.M. (2015). To monitoring the quality of recharge water of the Dnipro river basin in Zaporizhzhia. *Urban and Territorial Planning*, (55), 327–333.
7. Chushkina, I., Hapich, H., Matukhno, O., Pavlychenko, A., Kovalenko, V., & Sherstiuk, Y. (2024). Loss of small rivers across the steppe: climate change or the hand of man? Case study of the Chaplynka river. *International Journal of Environmental Studies*, 1–15. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314853>.

ABSTRACT

The purpose of the study is to develop mathematical models of the impact of climate change and man-made pollution on the water balance of river basins to predict water shortages, assess the effectiveness of environmental measures, and introduce innovative technologies to restore water resources in southern Ukraine.

Methods. The study is based on a statistical analysis of long-term observations of climatic and hydrological indicators of river basins in the southern regions of Ukraine. The data collected were based on bathymetric sensors installed in the canals to monitor water levels, soil moisture, precipitation, and changes in the water balance; soil moisture sensors at different depths with three times of critical summer temperatures; and meteorological data on precipitation, temperature regimes, and the duration of dry periods obtained from local weather stations.

Findings. The studies have shown a steady trend of decreasing moisture in the air and soil under conditions of elevated temperatures in the southern regions of Ukraine, which creates risks for technological processes and the agricultural sector. Based on the assessments, effective methods of integrated water resources management have been proposed to minimize the effects of drought in the southern regions of Ukraine.

The originality. An integral index of water restoration for the southern regions of Ukraine, which considers both climatic and anthropogenic factors, was developed for the first time. The mathematical

modeling of the impact of drought on the water balance of water bodies was carried out. A methodology for assessing the impact of precipitation on the water regime in different climatic zones is proposed. Recommendations for the use of local wastewater treatment technologies during periods of water shortage have been developed.

Practical implementation. The results of the study can be used to manage water resources in the southern regions of Ukraine, particularly in drought conditions. The study forms a toolkit for restoring the water balance of the water sector in the face of climate change, which is important for ensuring the sustainability of ecosystems and the region's economy.

Keywords: *water resources, climate change, drought, hydraulic regulation, water balance, environmental indicators.*