

CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER REGIME
OF THE SYNIUKHA RIVER BASIN, UKRAINEВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ВОДНИЙ РЕЖИМ БАСЕЙНУ
РІЧКИ СИНЮХА, УКРАЇНА

Nataliia I. Magas

nataly.magas@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2579-1465

Н. І. Магась,

канд. техн. наук, доцент

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. The Syniukha River basin is one of the key tributary catchments of the Southern Buh and substantially influences water availability in its lower reaches within the climatically vulnerable forest-steppe to steppe transition zone of Ukraine. *The aim of the study* is to assess long-term changes in the water regime of the Syniukha River basin under climate change using ERA5-Land reanalysis data for 1958–2025.

Method. The assessment was based on spatial averaging of daily and monthly time series of air temperature, precipitation, river runoff, soil moisture and climatic water-balance components within the basin, followed by non-parametric trend detection, slope estimation and structural change testing. Drought conditions were evaluated with standardized precipitation-based and precipitation–evapotranspiration-based indices at several temporal scales.

The results. It was found that the basin shows persistent warming, declining precipitation, rising atmospheric evaporative demand, increasing climatic water deficit, decreasing runoff, more frequent drought conditions and a progressive loss of soil moisture. Maximum air temperature increased by 2.74 degrees Celsius, annual precipitation decreased by 15.5 millimetres per decade, potential evapotranspiration increased by 17.2 millimetres per decade, and mean annual runoff declined by 1.58 millimetres per year. Two coherent clusters of structural changes were identified: the first, in 1997–1999, affected temperature-related indicators, whereas the second, in 2004–2006, affected runoff, drought conditions, climatic water deficit and soil moisture.

The scientific novelty of the paper lies in the first integrated reanalysis-based assessment of long-term changes in the water regime of the Syniukha River basin, combining thermal indicators, climatic water-balance components, runoff, drought conditions and soil moisture within a single analytical framework. For this basin, the study establishes for the first time a two-cluster hierarchy of structural changes: an early cluster in 1997–1999 related mainly to thermal reorganization, and a later cluster in 2004–2006 associated with runoff, drought conditions, climatic water deficit and soil moisture.

The practical importance of the results lies in their applicability to drought-risk assessment, evaluation of water-supply vulnerability and planning of climate-adaptation measures in the Southern Buh basin.

Key words: reanalysis data; river runoff; climatic water deficit; potential evapotranspiration; soil moisture; structural change; drought indices.

Анотація. Басейн річки Синюха є одним із ключових притокових водозборів Південного Бугу, що суттєво впливає на водність його пониззя в межах кліматично вразливої лісостепо-степової перехідної зони України. *Метою дослідження* є оцінка довгострокових змін водного режиму басейну річки Синюха під впливом кліматичних змін за даними реаналізу ERA5-Land за 1958–2025 рр.

Методика. Оцінювання виконано шляхом просторового узагальнення в межах басейну добових і місячних рядів температури повітря, опадів, стоку, вологості ґрунту та компонентів кліматичного водного балансу з подальшим використанням непараметричних методів виявлення трендів, оцінювання їх величини та визначення моментів структурної перебудови. Посушливість оцінювали за стандартизованими індексами, розрахованими для різних часових масштабів.

Результати. Встановлено, що для басейну характерні стійке потепління, скорочення опадів, зростання атмосферного попиту на вологу, збільшення кліматичного дефіциту вологи, зменшення стоку, посилення посушливих умов і прогресуюче висихання ґрунтового профілю. Максимальна температура повітря зросла на 2,74 градуса Цельсія, річні опади зменшилися на 15,5 міліметра за десятиріччя, потенційна евапотранспірація зросла на 17,2 міліметра за десятиріччя, а середній річний стік скорочувався на 1,58 міліметра за рік. Виявлено два

узгоджені кластери структурних змін: перший у 1997–1999 рр. охоплює насамперед температурні показники, другий у 2004–2006 рр. – стік, посушливість, дефіцит вологи та вологість ґрунту.

Наукова новизна роботи полягає у першому комплексному реаналізовому оцінюванні довгострокових змін водного режиму басейну річки Синюха з одночасним урахуванням термічних показників, компонентів водного балансу, стоку, посушливості та вологості ґрунту. Уперше для цього басейну встановлено двокластерну ієрархію структурних змін: ранній кластер 1997–1999 рр., пов'язаний насамперед із перебудовою термічного режиму, та пізніший кластер 2004–2006 рр., у межах якого синхронізуються зміни опадів, вологості ґрунту, індексу SPEI-12 і річного стоку.

Практична значимість результатів полягає у можливості їх використання для оцінки ризиків посух, вразливості водопостачання та планування адаптаційних заходів у басейні Південного Бугу.

Ключові слова: дані реаналізу; річковий стік; кліматичний дефіцит вологи; потенційна евапотранспірація; вологість ґрунту; структурні зміни; індекси посухи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Зміна клімату є одним із визначальних чинників трансформації водних ресурсів у помірних широтах [1]. Степова зона Південної України належить до регіонів з найвищою кліматичною вразливістю в Європі [2; 3]: напівпосушливий клімат, висока міжрічна мінливість стоку та обмежена водозабезпеченість. Численні дослідження фіксують зниження річного стоку степових річок України протягом останніх десятиліть [4; 5; 6]. Для басейну Південного Бугу показано зменшення водності та зростання ризиків вододефіциту [7; 8], однак більшість наявних робіт охоплюють або головну річку, або окремі гідрологічні показники без комплексного аналізу всіх компонентів водного балансу суббасейнів.

Річка Синюха є найпотужнішим лівим притоком Південного Бугу, забезпечуючи 41–63 % його сумарного стоку у низині [9]. Її басейн розташований у межах кліматично вразливої лісостепо-степової перехідної зони, що підсилює чутливість водного режиму до змін температури, зволоження та випаровуваності.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Вивчення впливу кліматичних змін на водні ресурси України, водозабезпеченість основних річкових басейнів і внутрішньорічний розподіл стоку протягом останніх десятиліть стало одним із провідних напрямів сучасної гідрології та гідроекології [2; 3; 4]. Для басейну Південного Бугу накопичено значний масив праць, присвячених сучасному водному режиму, водогосподарській ситуації та якості річкових вод [5; 6; 8]. Водночас притоки нижнього Побужжя, зокрема р. Синюха, досліджені менш системно, а більшість наявних публікацій охоплює окремі гідрологічні, гідроекологічні або водогосподарські аспекти без цілісної басейнкової оцінки довготривалої трансформації водного режиму.

У попередніх роботах автора для р. Синюха охарактеризовано природно-кліматичні умови формування сучасного гідроекологічного стану низин, проаналізовано гідрологічні особливості та водогосподарську діяльність у нижній ділянці річки, а також

оцінено її сучасний екологічний стан [9; 10; 11]. У цих працях показано тривалу маловодну фазу, що розпочалася з 2007 р., більш ніж двократне зменшення витрат води та суттєву роль природно-кліматичних чинників у трансформації водності річки [9; 10]. Проте наявні дослідження були зосереджені переважно на пониззі річки, її гідроекологічних характеристиках, водогосподарському використанні або фізико-географічних передумовах функціонування, тоді як басейнова, довгострокова й методично уніфікована оцінка змін водного режиму за єдиним реаналізовим джерелом для всього водозбору раніше не виконувалася.

Для аналізу компонентів водного балансу широко застосовується реаналіз ERA5-Land (ECMWF) завдяки просторовій (~9 км) і часовій (1950–дотепер) охопленості та верифікованій якості для регіону [16]. Тест Манна–Кендалла [17; 18] і нахил Сена [19] є стандартними непараметричними інструментами для виявлення монотонних трендів у гідрокліматичних рядах без припущення про нормальний розподіл. Для детектування структурних змін у гідрологічних рядах застосовують тест Петтітта [20], реалізований у пакеті R trend [21].

Індекси посушливості SPI [22] і SPEI [23] дозволяють кількісно оцінити дефіцит зволоження на різних часових масштабах. Поєднане використання цих індексів дає змогу надійніше виявляти тенденції до аридизації та розмежовувати короточасні й довготривалі прояви дефіциту вологи [24].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на наявні дослідження [4; 9; 10], залишається невирішеним питання структурної трансформації водного режиму басейну р. Синюха під впливом кліматичних змін. Зокрема, відсутні: (1) кількісна оцінка трендів основних компонентів водного балансу за єдиним реаналізовим джерелом; (2) встановлення точок структурної зміни гідрологічного режиму; (3) узгоджена інтерпретація зв'язку між потеплінням, дефіцитом вологи, посушливістю та скороченням стоку. Саме ці аспекти визначають логіку дослідження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є оцінка довгострокових змін водного режиму басейну р. Синюха під впливом кліматичних змін за даними реаналізу ERA5-Land за 1958–2025 рр.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Басейн р. Синюха розташований на межі Байрачного Степу і Лісостепу. Річка бере початок поблизу с. Скелевате (Кіровоградська обл.) у місці злиття Тікичу і Великої Висі, має довжину 111 км і впадає до Південного Бугу у Первомайську. Площа басейну – близько 16 200 км², адміністративно охоплює частини Черкаської, Кіровоградської та Миколаївської областей [9]. Басейн є важливим лівобережним суббасейном Південного Бугу та вирізняється поєднанням лісостепових і степових рис, що підсилює його чутливість до змін співвідношення опадів і випаровуваності. Поєднання помірно континентального клімату, зростаючого дефіциту вологи, високої сільськогосподарської освоєності водозбору та суттєвої ролі річки у формуванні водності нижнього

Побужжя робить цей басейн показовим об'єктом для оцінки довгострокових кліматично зумовлених змін водного режиму. Середньорічна температура становить 8,9 °C, річна сума опадів – 603 мм/рік (ERA5-Land, 1958–2025), клімат – помірно-континентальний із рисами напівпосушливості.

Об'єктом дослідження є водний режим басейну р. Синюха як важливого лівобережного суббасейну Південного Бугу.

Предмет дослідження – довгострокові кліматично зумовлені зміни температурного режиму, опадів, компонентів водного балансу, стоку, посушливості та вологості ґрунту в межах басейну.

Просторове положення басейну, конфігурацію водозбору та гідрографічну мережу наведено на рис. 1.

Для аналізу довгострокових змін водного режиму басейну р. Синюха використано дані реаналізу ERA5-Land і кліматичного продукту TerraClimate. Характеристику використаних наборів даних, змінних, часове охоплення та просторову роздільну здатність наведено в табл. 1.

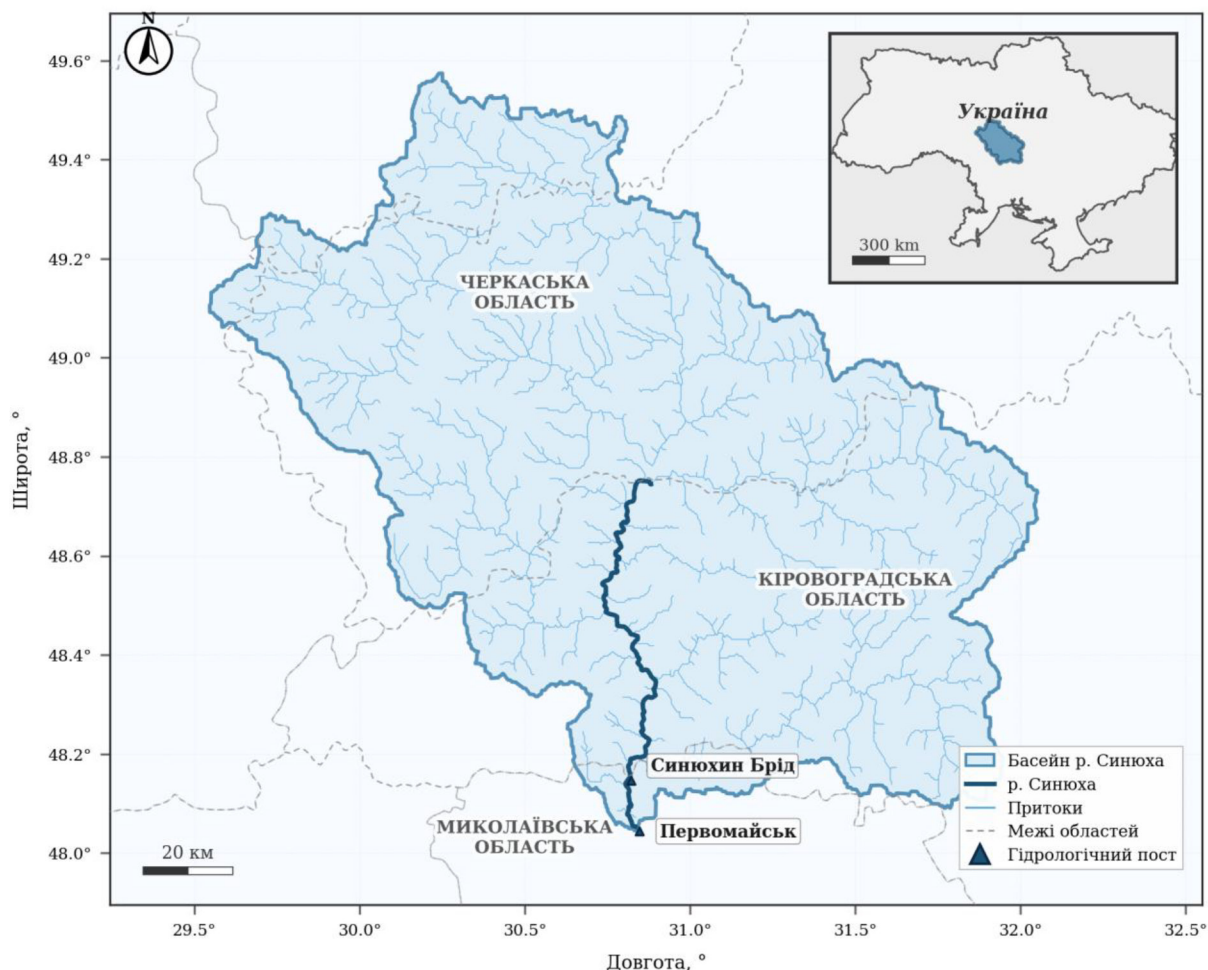


Рис. 1. Басейн р. Синюха: розташування, межі водозбору та гідромережа

Примітка. Джерела просторових даних: HydroBASINS, HydroSHEDS, FAO GAUL, OpenStreetMap

Таблиця 1. Використані набори даних та їх характеристики

Набір даних	Змінні	Період	Роздільна здатність
ERA5-Land (ECMWF) [16]	$T_{\max}$, $T_{\min}$, P , runoff, PET, soil water, snow	1958–2025	~9 км; добова (для $T_{\max}$, $T_{\min}$ та температурних екстремумів), місячна (для P , runoff, PET, soil water, snow, SPI/SPEI)
TerraClimate [25]	P , AET, PET, DEF, runoff	1958–2025	~4 км, місячна

Основним джерелом для аналізу довгострокових трендів температури, опадів, стоку, снігового компонента та вологості ґрунту був ERA5-Land [16]. З добо-вих даних ERA5-Land обчислювали максимальну і мінімальну температуру повітря, добову амплітуду температури ($DTR = T_{\max} - T_{\min}$), а також річну кількість спекотних днів ($T_{\max} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), тропічних ночей ($T_{\min} > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) і морозних днів ($T_{\min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Із місячних рядів ERA5-Land аналізували опади, стік, сніговий компонент, температуру ґрунту за чотирма шарами (0–7, 7–28, 28–100 і 100–289 см), об'ємну вологість ґрунту за трьома шарами (0–7, 7–28 і 28–100 см) та індекси посушливості. TerraClimate [25] використано для оцінки компонентів кліматичного водного балансу (AET, PET, DEF) та незалежної перевірки знаку тренду стоку. Сезонний аналіз виконували для зими (XII–II), весни (III–V), літа (VI–VIII) та осені (IX–XI). Довгострокові тренди оцінено непараметричним тестом Манна-Кендалла [17; 18]. Величину тренду розраховано методом Сена [19]. Точки структурної зміни ідентифіковано тестом Петтітта [20], реалізованим у пакеті R trend [21]. Індекси посушливості: SPI [22] – за масштабами 1–24 міс. із місячних рядів опадів ERA5-Land; SPEI [23] – за місячними рядами різниці $P - PET$ на основі ERA5-Land. Класифікація посух: помірна ($< -1,0$), сильна ($< -1,5$), екстремальна ($< -2,0$). Статистично значущими вважали результати за $p < 0,05$. Кліматична норма – 1961–1990 рр. Всі розрахунки виконано у R 4.x [26].

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Оцінку змін водного режиму басейну р. Синюха здійснено за його основними складовими: температурним режимом, водним балансом, стоком, посушливістю та вологістю ґрунту.

Аналіз за 1958–2025 рр. виявив статистично значуще потепління за всіма температурними показниками (табл. 2). Підвищення максимальної та мінімальної температури має близьку інтенсивність, що відображено на рис. 2 і вказує на узгоджене посилення як денного, так і нічного теплового режиму,

тоді як добовий перепад температури змінюється слабше.

Аналіз теплових екстремумів виявив різкіші зміни порівняно із середніми температурними показниками: кількість спекотних днів і тропічних ночей зростає, тоді як морозні дні зменшуються, а точки структурної зміни для цих індикаторів зосереджені у 1997–1999 рр. Відповідні часові ряди наведено на рис. 3, а детальні кількісні параметри трендів – у табл. 2.

Упродовж періоду дослідження річна сума опадів у басейні зменшується, причому найвиразніше скорочення простежується влітку, тоді як осінні зміни залишаються статистично незначущими (табл. 3).

На цьому тлі потенційна евапотранспірація за даними TerraClimate зростає, тоді як фактична евапотранспірація істотно не змінюється. У результаті дефіцит вологи послідовно збільшується, що відображає перехід до більш напруженого воднобалансового режиму басейну (табл. 3; рис. 4).

Зміни компонентів водного балансу супроводжуються виразним скороченням річного стоку (табл. 4; рис. 5). Сучасні значення є помітно нижчими за кліматичну норму 1961–1990 рр., а від'ємний тренд за даними ERA5-Land підтверджується і незалежними даними TerraClimate.

Точка структурної зміни припадає на 2006 р., після чого річний стік різко зменшується; близький за величиною спад простежується в усі сезони (табл. 4; рис. 6). Одночасне зниження коефіцієнта стоку та снігового компонента вказує на ослаблення ролі снігового живлення у формуванні стоку.

Виявлені зміни опадів, евапотранспірації та стоку закономірно відбилися і на динаміці індексів посушливості. Із зростанням часової масштабності тренди SPEI стають більш виразними, а для дванадцятимісячного індексу фіксується стійкий від'ємний тренд і зміна середнього рівня після 2006 р., що свідчить про перебудову режиму зволоження (табл. 5; рис. 7).

Додатково це підтверджується частотою посушливих місяців за SPEI-12 та серією посушливих

Таблиця 2. Тренди температурних показників, басейн р. Синюха (ERA5-Land, 1958–2025)

Показник	τ (МК)	β_{Sen} ($^{\circ}\text{C}/\text{рік}$)	R^2	p (МК)	Δ за 68 р.	Рік зламу
$T_{\max}$, $^{\circ}\text{C}/\text{рік}$	0,476	+0,041	0,449	$9,9 \times 10^{-9}$ ***	+2,74 $^{\circ}\text{C}$	–
$T_{\min}$, $^{\circ}\text{C}/\text{рік}$	0,451	+0,037	0,412	$5,4 \times 10^{-8}$ ***	+2,46 $^{\circ}\text{C}$	–
DTR, $^{\circ}\text{C}/\text{рік}$	0,281	+0,004	0,124	$7,2 \times 10^{-4}$ ***	–	–
Спекотні дні, дн/рік	–	+0,228	–	$<0,001$ ***	+10,6 (+240 %)	1997
Тропічні ночі, дн/рік	–	+0,183	–	$<0,001$ ***	+8,3 (+408 %)	1997
Морозні дні, дн/рік	–	–0,403	–	$<0,001$ ***	–16,3 (–14 %)	1999

Примітка. τ – коефіцієнт Кендалла; β_{Sen} – нахил Сена. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$.

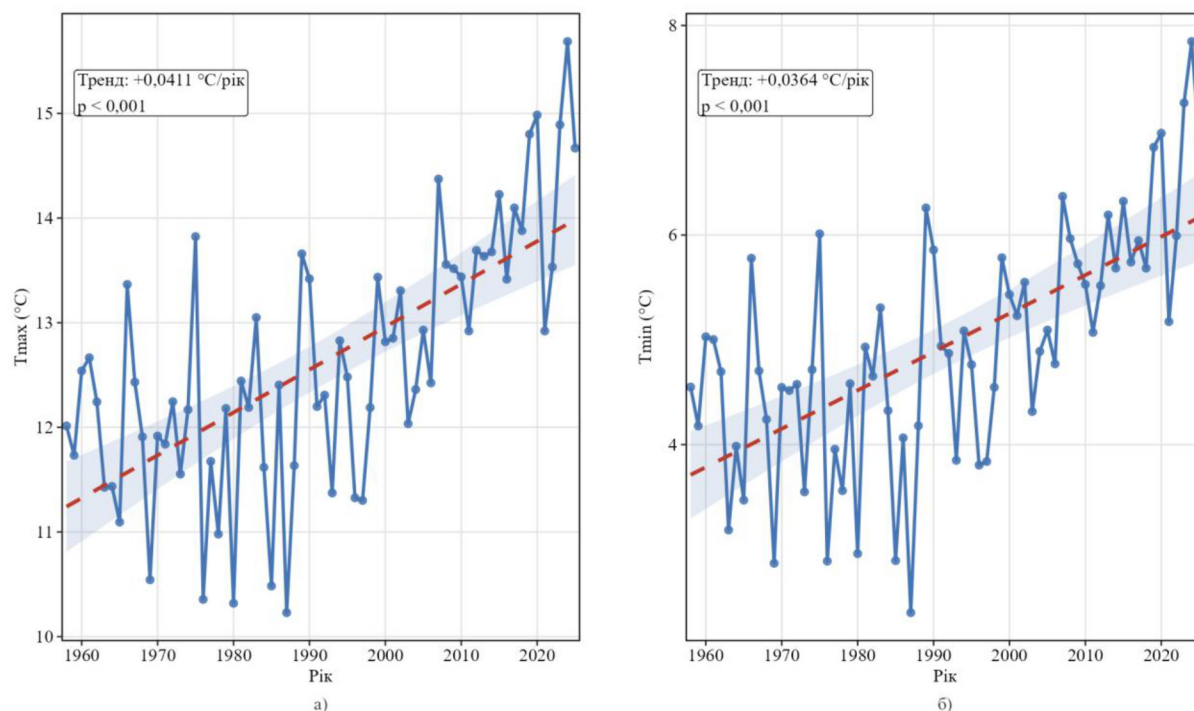


Рис. 2. Динаміка максимальної та мінімальної температури повітря в басейні р. Синюха: а) максимальна температура повітря ($T_{\max}$); б) мінімальна температура повітря ($T_{\min}$)

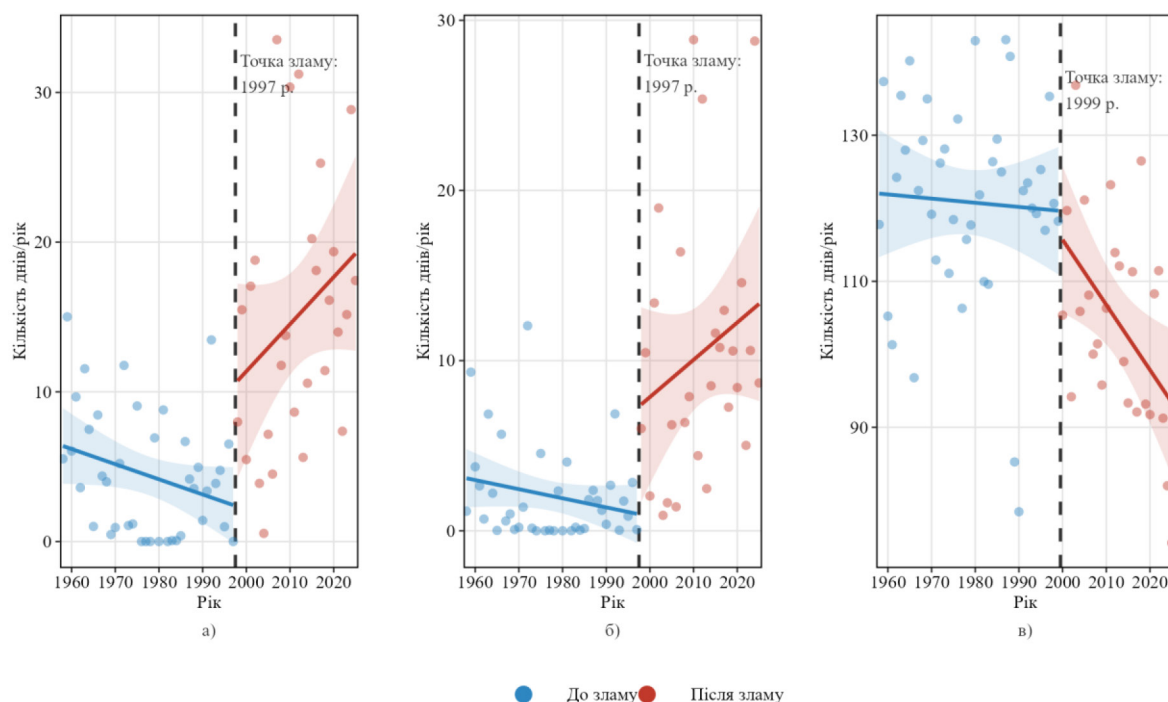
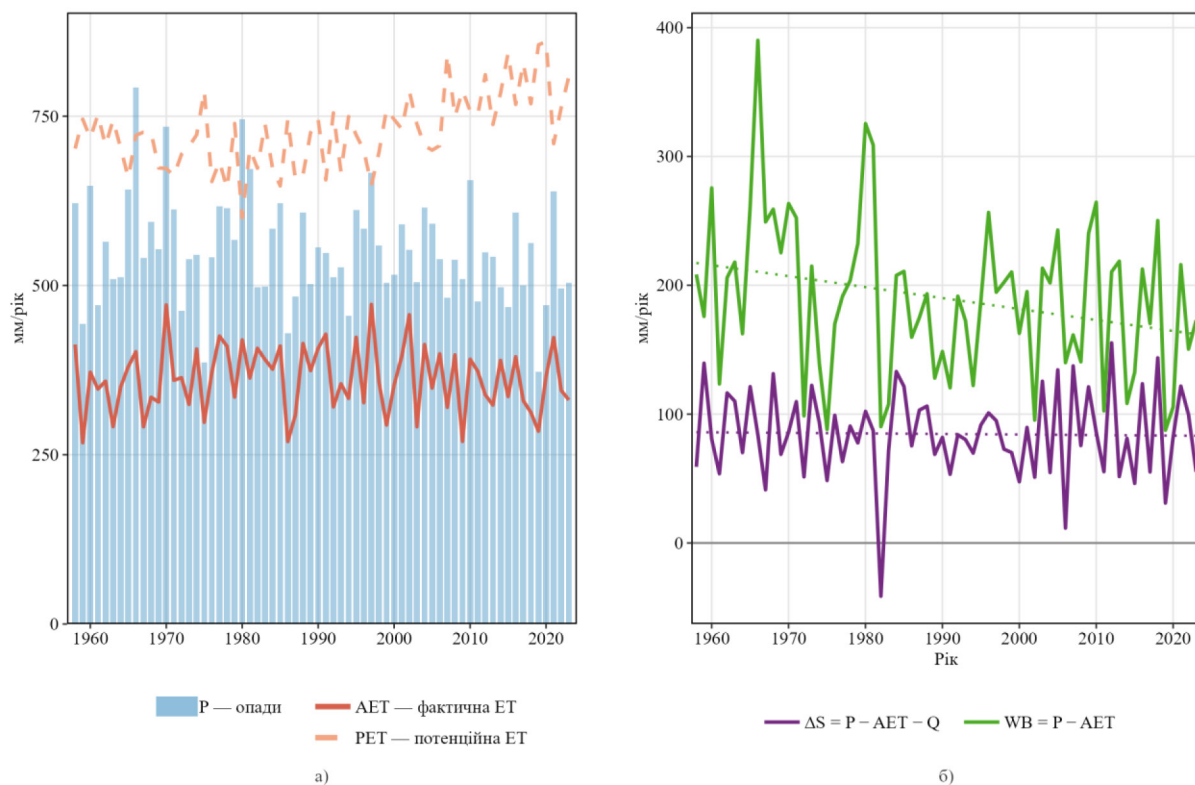


Рис. 3. Динаміка теплових екстремумів у басейні р. Синюха: а) спекотні дні ($T_{\max} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$); б) тропічні ночі ($T_{\min} > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$); в) морозні дні ($T_{\min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Таблиця 3. Тренди опадів, евапотранспірації та дефіциту вологи, басейн р. Синюха (TerraClimate, 1958–2025)

Змінна	β_{Sen} (мм/10 р.)	R^2	$p(MK)$	Загальна зміна	Рік зламу
Річні опади	-15,5	0,110	0,004**	-104 мм	2005
Опади – літо	-10,7	0,150	<0,001***	-72 мм	2005
Опади – зима	-4,1	0,048	0,100 н.з.	-28 мм	–
PET	+17,2	0,325	<0,001***	+113 мм	1998
AET	-2,1	0,008	0,537 н.з.	-14 мм	–
DEF = PET – AET	+19,8	0,176	0,001**	+131 мм	2006

Примітка. DEF – дефіцит кліматичного водного балансу. н.з. – незначущий ($p \geq 0,05$).

**Рис. 4.** Компоненти водного балансу басейну р. Синюха: а) річні опади (P), потенційна евапотранспірація (PET) та фактична евапотранспірація (AET); б) водний баланс ($WB = P - AET$) і зміна запасів вологи ($\Delta S = P - AET - Q$)**Таблиця 4.** Статистика трендів стоку, басейн р. Синюха (ERA5-Land, 1958–2025)

Змінна	τ (МК)	p (МК)	β_{Sen} (мм/рік)	Рік зламу	До зламу	Після зламу	Δ , %
Річний стік (ERA5)	-0,385	<0,001***	-1,58	2006	131,3 мм	47,0 мм	-64,2
Весняний стік	-0,336	<0,001***	-0,55	2006	50,0 мм	18,3 мм	-63,4
Літній стік	-0,356	<0,001***	-0,43	2006	36,2 мм	13,3 мм	-63,2
Осінній стік	-0,368	<0,001***	-0,21	2006	19,7 мм	7,1 мм	-63,9
Зимовий стік	-0,385	<0,001***	-0,28	2006	25,3 мм	8,2 мм	-67,4
Коеф. стоку RC	-0,372	<0,001***	-0,002	2006	–	–	–
Сніготанення	-0,227	0,006**	-0,76	1981	–	–	–

Примітка. τ – коефіцієнт Кендалла. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$.

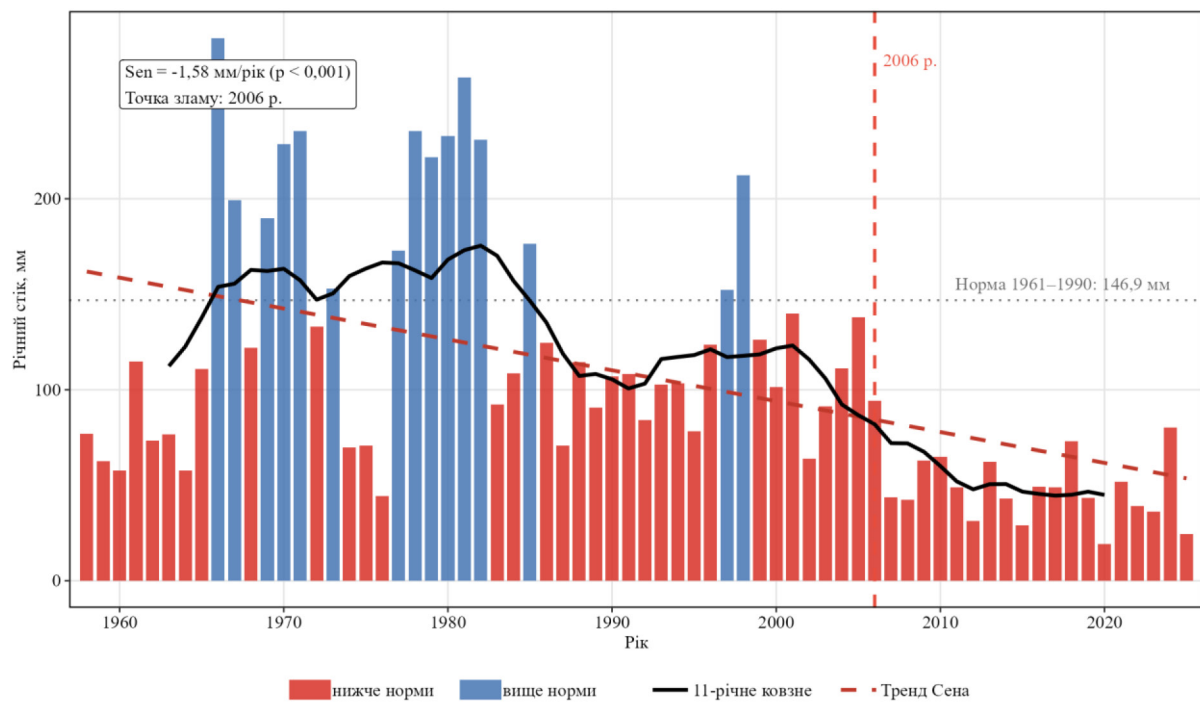


Рис. 5. Динаміка річного стоку в басейні р. Синюха

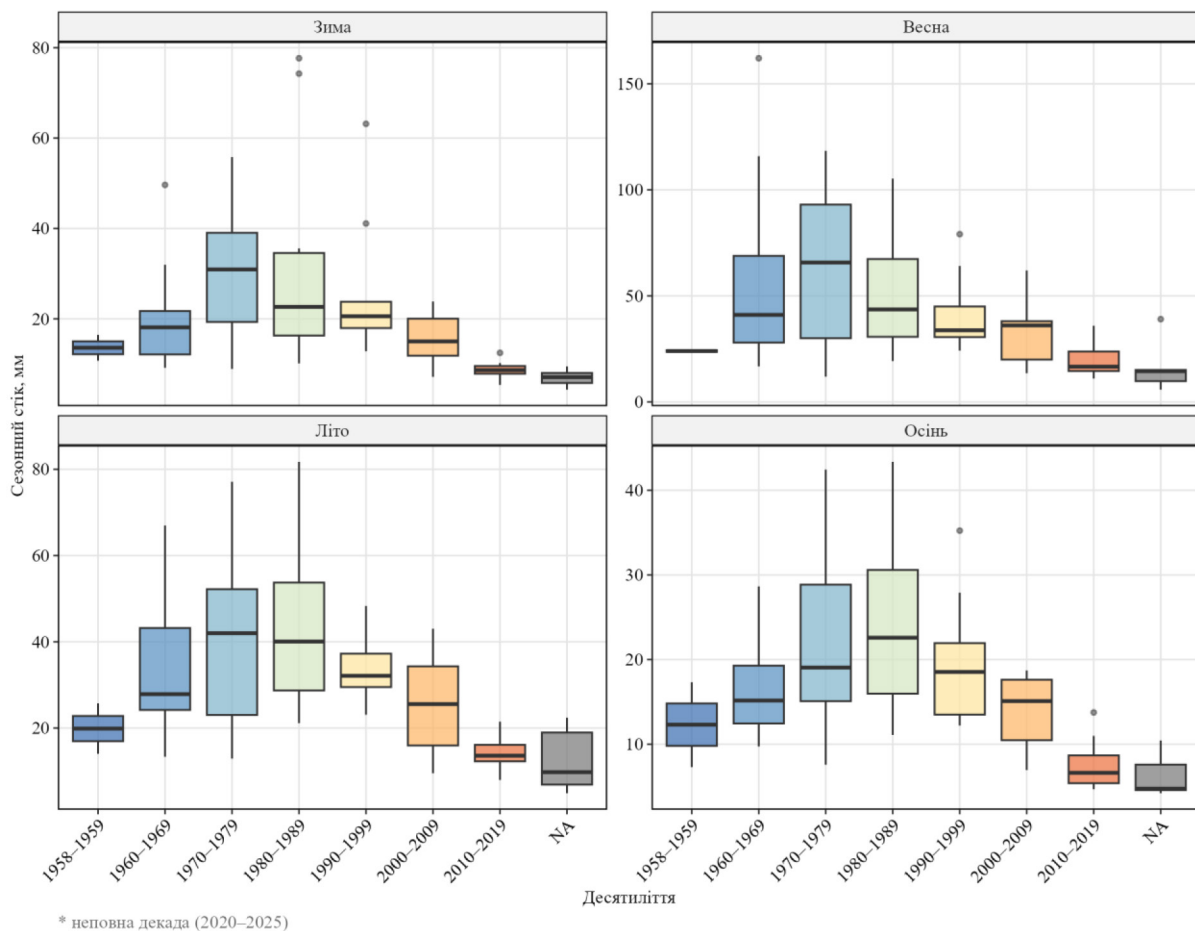


Рис. 6. Сезонний розподіл стоку в басейні р. Синюха

епізодів за SPI-12, серед яких найінтенсивніший припадає на 2019–2020 рр. (рис. 8–9).

Поведінка ґрунтових показників підтверджує системний характер аридизаційних змін у басейні р. Синюха (рис. 10). Температура ґрунту в усіх чотирьох шарах демонструє стійкий висхідний тренд, а точки структурної зміни для термічного режиму зосереджені наприкінці 1990-х років. Водночас об'ємна вологість ґрунту в усіх доступних для аналізу шарах профілю (0–7, 7–28 і 28–100 см) знижується із синхронним зломом у 2004 р., що відображає послідовний перехід від посилення термічного режиму до стійкого висихання ґрунтового профілю. Оскільки від'ємні тренди охоплюють як поверхневі, так і глибші шари, встановлені зміни слід трактувати як інтегральний прояв зростання атмосферного попиту на вологу та зменшення її доступних запасів у басейні.

Взаємозв'язок між встановленими змінами термічного режиму, зволоження та стоку кількісно підтверджується кореляційним аналізом (табл. 6). Найтісніші зв'язки простежуються між вологістю верхнього шару ґрунту 0–7 см та опадами ($r = 0,866$), стоком ($r = 0,665$), SPEI-12 ($r = 0,641$), тоді

як з температурою та PET вони мають виразний від'ємний характер ($r = -0,698$ і $-0,742$ відповідно).

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Скорочення стоку р. Синюха найкраще пояснюється синергетичною дією двох кліматичних чинників – зменшенням опадів і зростанням потенційної евапотранспірації. Приріст DEF на +131 мм відображає накопичення кліматичного водного боргу, а зниження коефіцієнта стоку після 2006 р. вказує на зміну співвідношення між стіканням і випаровуванням на користь останнього. У поєднанні зі зменшенням снігового компонента це свідчить про послаблення ролі снігового живлення та перехід до більш дощового типу формування стоку. Виявлена ієрархія точок структурної зміни показує, що перебудова водного режиму мала не одномоментний, а фазовий характер; узагальнення цих переломів за основними показниками наведено на рис. 11. Перший кластер переломів, зосереджений у 1997–1999 рр., охоплює теплові екстремуми, температуру ґрунту, SPEI-1/-3 та PET і часово збігається з сильним Ель-Ніньо 1997–1998 рр. та

Таблиця 5. Тренди індексів SPEI, басейн р. Синюха (ERA5-Land, 1958–2025)

Масштаб	β_{Sen} (од/10 р.)	R^2	p (МК)	Заг. зміна	Рік зламу	До зламу	Після зламу
SPEI-1	-0,061	0,115	0,005**	-0,40	1998	+0,158	-0,094
SPEI-3	-0,096	0,126	0,004**	-0,62	1998	+0,260	-0,150
SPEI-6	-0,136	0,152	0,001**	-0,88	2006	+0,319	-0,399
SPEI-12	-0,178	0,202	<0,001***	-1,16	2006	+0,424	-0,576
SPEI-24	-0,231	0,257	<0,001***	-1,50	2006	+0,558	-0,748

Примітка. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$.

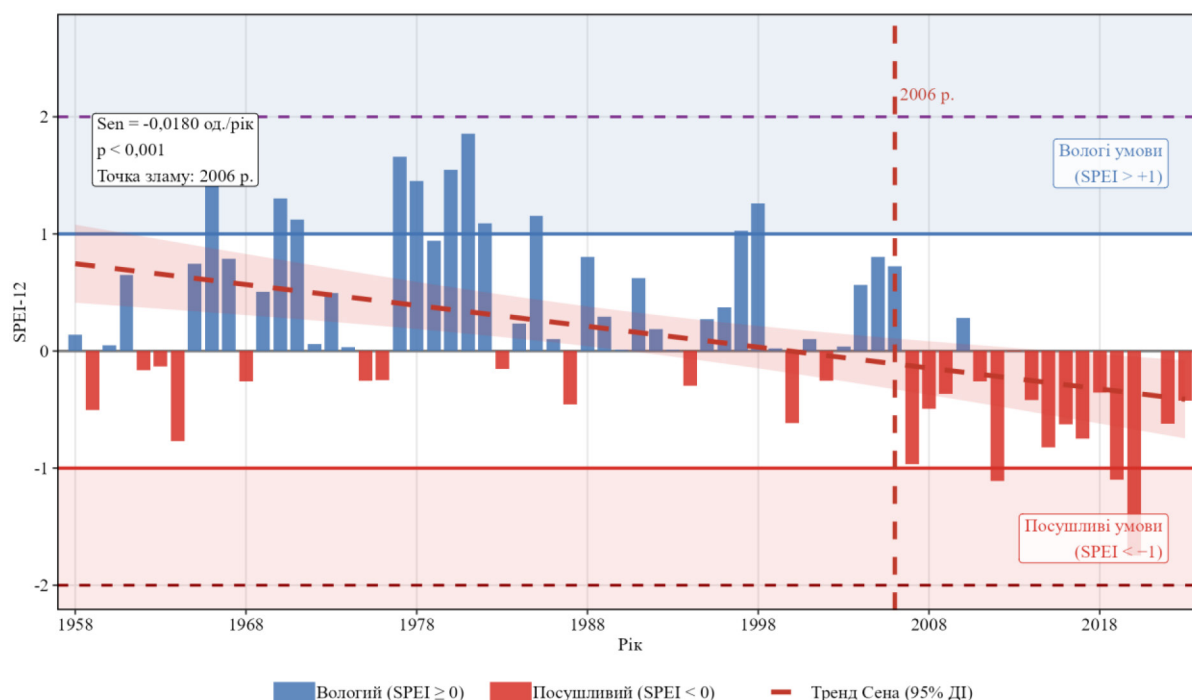


Рис. 7. Динаміка SPEI-12 у басейні р. Синюха

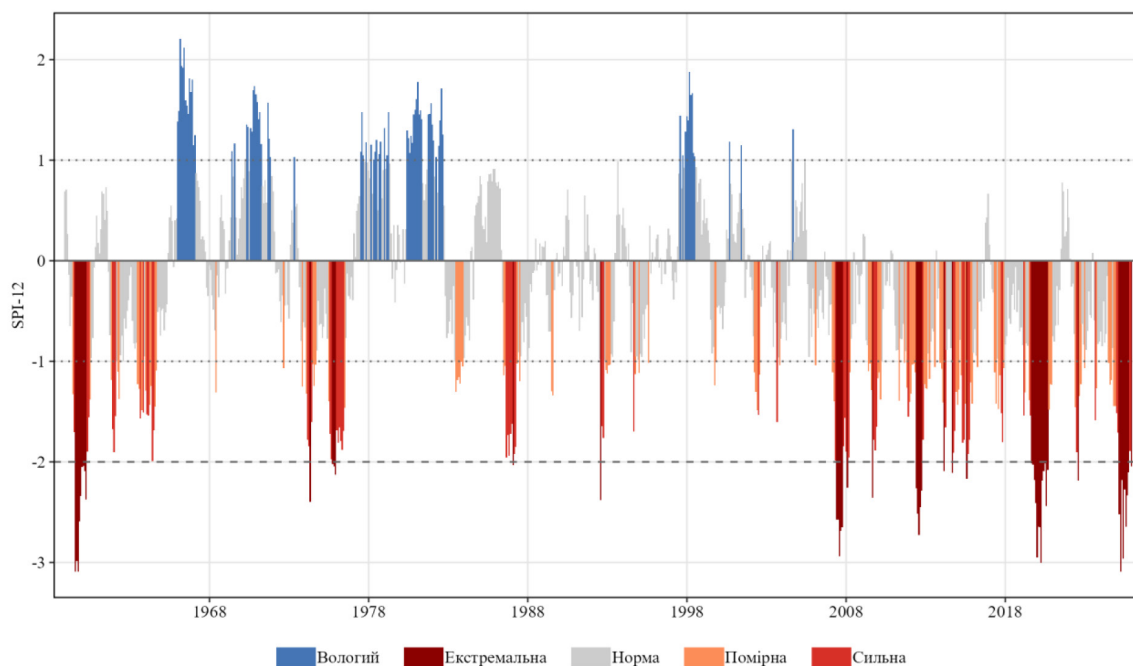


Рис. 8. Динаміка SPI-12 у басейні р. Синюха

Примітка. Пунктирні лінії – пороги помірної та екстремальної посухи.

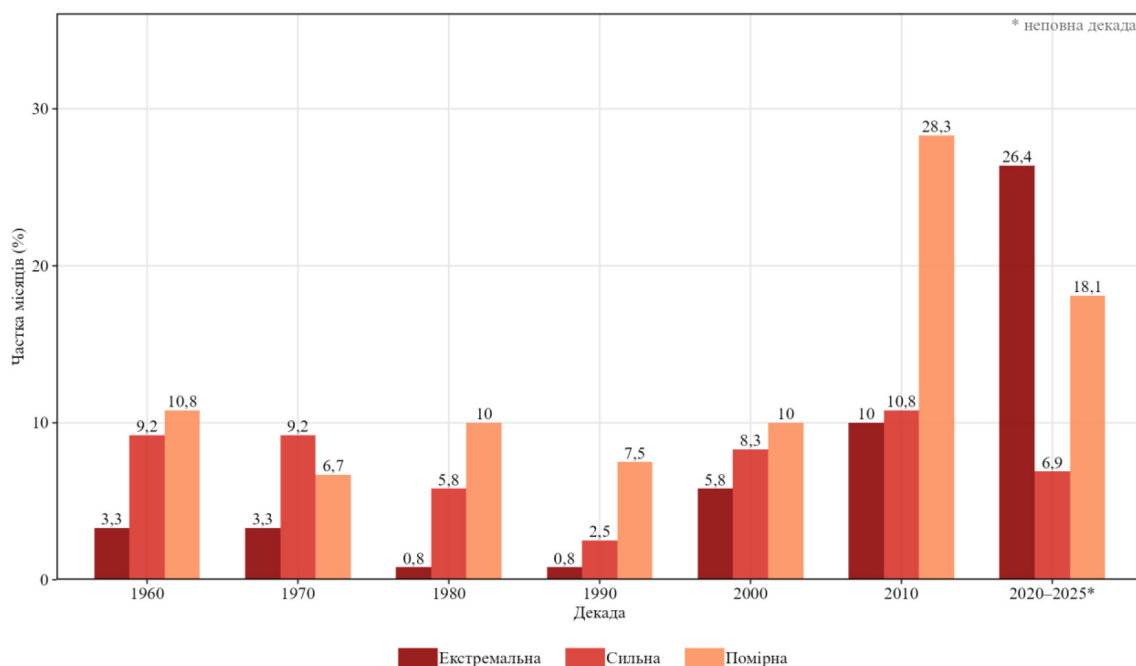


Рис. 9. Частота посушливих умов за десятиліттями у басейні р. Синюха

Таблиця 6. Вибрані коефіцієнти кореляції Спірмена між ключовими змінними, басейн р. Синюха (1958–2025)

Змінна	SW1	Опади	Темп.	PET	Стік	SPEI-12
SW1 (0–7 см)	1,000	0,866	–0,698	–0,742	0,665	0,641
SW3 (28–100 см)	0,973	0,830	–0,726	–0,795	0,747	0,725
Опади	0,866	1,000	–0,498	–0,652	0,553	0,525
Температура	–0,698	–0,498	1,000	0,586	–0,720	–0,752

Примітка. SW1 – вологість ґрунту 0–7 см; SW3 – 28–100 см. Усі коефіцієнти значущі на рівні $p < 0,001$.

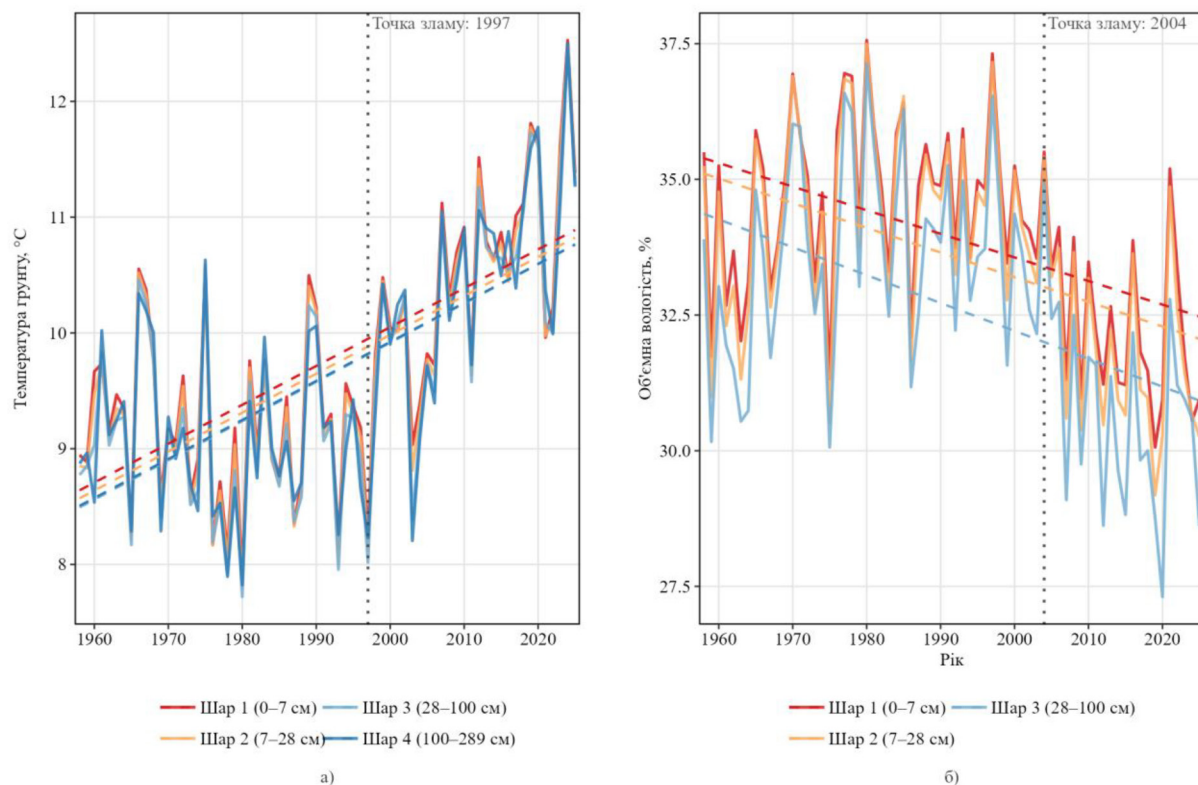


Рис. 10. Температура ґрунту та об'ємна вологість ґрунту в басейні р. Синюха: а) температура ґрунту; б) об'ємна вологість ґрунту

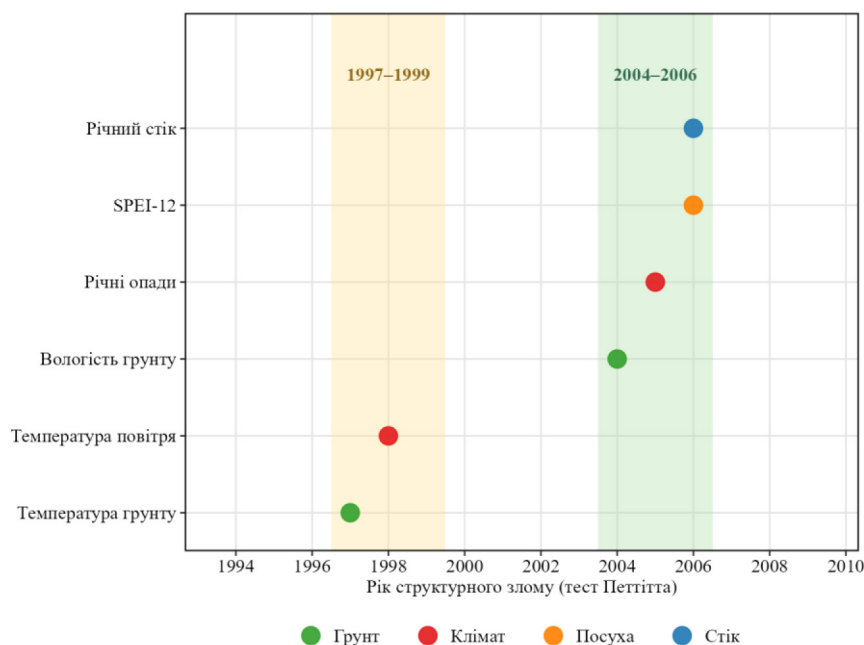


Рис. 11. Точки структурної зміни гідрокліматичних показників басейну р. Синюха

переходом NAO у позитивну фазу [27], що, ймовірно, відображає вплив великомасштабної кліматичної перебудови наприкінці 1990-х років. Другий кластер, що припадає на 2004–2006 рр., охоплює стік, SPEI-12/-24, DEF та вологість ґрунту і узгоджується із

загальноєвропейською тенденцією до посилення аридизації після 2005 р. [14; 15]. Рік точки зламу стоку ERA5-Land (2006 р.) узгоджується зі спостереженнями на гідропосту Синюхин Брід, де маловодна фаза зафіксована з 2007 р. [9]; різниця в один рік, ймовірно,

відображає часову затримку між кліматичним сигналом і гідрологічною реакцією. У цьому контексті одержані басейнові результати розширюють попередні дослідження пониззя р. Синюха, переводячи локально встановлені гідроекологічні та водогосподарські спостереження у масштаб довготривалої клімато-гідрологічної перебудови всього водозбору [9; 10; 11]. Збіг переломів у динаміці опадів, РЕТ, дефіциту вологи, SPEI, вологості ґрунту та стоку свідчить про узгоджену реакцію основних компонентів водного режиму на посилення аридизації, а отже підсилює висновок про провідну роль кліматичних чинників у трансформації водного режиму басейну р. Синюха. Отримані результати узгоджуються з оцінками аридизації Південно-Східної Європи [14; 15], із висновками щодо виокремлення кліматичного сигналу в трендах стоку степових річок Центральної Європи [13], а також із дослідженнями по басейну Південного Бугу та регіональними оцінками посушливості [8; 24].

ВИСНОВКИ

1. За 1958–2025 рр. у басейні р. Синюха зафіксовано статистично значуще потепління: $T_{\max}$ зростає на $+2,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($+0,041\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{рік}$; $p < 0,001$), $T_{\min}$ – на $+2,46\text{ }^{\circ}\text{C}$, а точки структурної зміни теплових екстремумів зосереджені у 1997–1999 рр. Збільшення кількості спекотних днів і тропічних ночей та одночасне скорочення морозних днів свідчать про посилення теплового навантаження на басейн.

2. Річні опади в басейні р. Синюха демонструють статистично значущий спадний тренд, тоді як потенційна евапотранспірація зростає, що зумовлює прогресуюче посилення дефіциту вологи та формує аридизаційний тип змін водного балансу. Структурні зміни цього блоку припадають переважно на 1998–2006 рр., що вказує на перехід до стійкішого вододефіцитного режиму.

3. Середній річний стік зменшується зі швидкістю – $1,58\text{ мм}/\text{рік}$ ($p < 0,001$), а після 2006 р. його величина скоротилася на $64,2\%$ відносно попереднього підперіоду. Одночасне зниження коефіцієнта стоку та снігового компонента вказує на послаблення ролі снігового живлення і зростання залежності режиму стоку від дощового поповнення та випаровування.

4. Індекси посушливості підтверджують системне посилення аридизації: для SPEI-12 встановлено тренд – $0,178\text{ од}/10\text{ р.}$ ($p < 0,001$) і перехід середніх значень від $+0,42$ до $-0,58$ після 2006 р., а SPI-12 зафіксував 44 посушливих епізоди, найінтенсивніший з яких спостерігався у 2019–2020 рр.

5. Температура ґрунту в усіх чотирьох шарах ERA5-Land демонструє стійкий висхідний тренд, тоді як об'ємна вологість ґрунту в усіх трьох аналізованих шарах знижується. Точка зламу для температури ґрунту припадає на 1997 р., а для вологості ґрунту – на 2004 р., що відображає часово послідовний перехід від посилення термічного режиму до стійкого висихання ґрунтового профілю.

6. Сукупність одержаних результатів засвідчує, що трансформація водного режиму басейну р. Синюха має не ізольований, а системний характер і формується як послідовний ланцюг змін: потепління → зростання атмосферного попиту на вологу → посилення дефіциту вологи та посушливості → скорочення стоку. Встановлена двокластерна ієрархія структурних змін, що охоплює ранній термічний етап 1997–1999 рр. і пізніший гідролого-посушливий етап 2004–2006 рр., відображає поетапну кліматично зумовлену перебудову басейнової системи. Практична значимість результатів полягає у можливості їх використання для оцінювання вразливості водних ресурсів, планування адаптаційних водогосподарських заходів і подальшого сценарного моделювання водності та посушливості басейну р. Синюха.

REFERENCES

- [1] IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [2] Snizhko, S., Didovets, I., & Bronstert, A. (2024). Ukraine's water security under pressure: Climate change and wartime. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 233. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00782-5>
- [3] Didovets, I., Krysanova, V., Hattermann, F. F., Rivas López, M. del R., Snizhko, S., & Müller Schmied, H. (2020). Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100761. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100761>
- [4] Gorbachova, L. O. (2015). The intra-annual streamflow distribution of Ukrainian rivers in different phases of long-term cyclical fluctuations. *Energetika*, 61(2), 71–80.
- [5] Grebin, V. V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrainy (landshaftno-hidrolohichnyi analiz) [Contemporary water regime of Ukrainian rivers (landscape-hydrological analysis)]*. Kyiv : Nika-Tsentr. [in Ukrainian]
- [6] Khilchevskiy, V. K., Chunarov, O. V., & Romas, M. I. (2006). Vodohospodarska obstanovka v baseini r. Pivdennoyi Buhu ta vplyv na nei Pivdenno-Ukrainskoho enerhokompleksu [Water management situation in the Southern Buh River basin and the influence of the South Ukrainian energy complex on it]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 93–94, 63–69. [in Ukrainian]
- [7] Snizhko, S., Didovets, I., Zasiadko, V., Andrushevych, A., & Horodyskyy, I. (2022). Climate damage caused by Russia's war in Ukraine. Initiative on GHG accounting of war. *Ecodia*, Kyiv.
- [8] Khilchevskiy, V. K., Chunarov, O. V., Romas, M. I., Yatsiuk, M. V., & Babych, M. Ya. (2009). *Vodni resursy ta yakist richkovykh vod baseinu Pivdennoho Buhu [Water resources and water quality of the Southern Buh basin]*. Kyiv : Nika-Tsentr. [in Ukrainian]

- [9] Magas, N., & Tuz, R. (2025). Hydrological features and characteristics of water management activities in the lower reaches of the Syniukha River. *Environmental Safety and Natural Resources*, 53(1), 22–34. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.22-34> [in Ukrainian]
- [10] Magas, N. I. (2024a). Characteristics of natural and climatic factors that influence the current hydroecological state of lower reaches of the Syniukha River. *Environmental Sciences*, 4(55), 59–69. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.10> [in Ukrainian]
- [11] Magas, N. I. (2024b). The current hydrochemical and ecological state of the lower reaches of the Sinyukha River. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 30, 35–47. <https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.04> [in Ukrainian]
- [12] Lešččen, I., Gnjjato, S., Galinović, I., & Basarin, B. (2024). Hydrological drought assessment of the Sava River basin in South-Eastern Europe. *Journal of Water and Climate Change*, 15(8), 3902–3918. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.157>
- [13] Collignan, J., Polcher, J., Bastin, S., & Quintana-Segui, P. (2025). Identifying and quantifying the impact of climatic and non-climatic drivers on river discharge in Europe. *Water Resources Research*, 61(4), e2024WR038220. <https://doi.org/10.1029/2024WR038220>
- [14] Spinoni, J., Naumann, G., & Vogt, J. V. (2017). Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Global and Planetary Change*, 148, 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.012>
- [15] Ionita, M., & Nagavciuc, V. (2021). Changes in drought features at the European level over the last 120 years. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(5), 1685–1701. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1685-2021>
- [16] Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- [17] Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
- [18] Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed.). Charles Griffin.
- [19] Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
- [20] Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126–135.
- [21] Pohlert, T. (2023). trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection (R package, version 1.1.6). <https://CRAN.R-project.org/package=trend>
- [22] McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc. 8th Conf. Applied Climatology*, 179–183.
- [23] Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the SPEI. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718.
- [24] Spinoni, J., Vogt, J. V., Naumann, G., Barbosa, P., & Dosio, A. (2018). Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology*, 38(4), 1718–1736. <https://doi.org/10.1002/joc.5291>
- [25] Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5, 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- [26] R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. <https://www.R-project.org/>
- [27] Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottensen, G., & Visbeck, M. (Eds.). (2003). *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/134GM01>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [2] Snizhko, S., Didovets, I., & Bronstert, A. (2024). Ukraine's water security under pressure: Climate change and wartime. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 233. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00782-5>
- [3] Didovets, I., Krysanova, V., Hattermann, F. F., Rivas López, M. del R., Snizhko, S., & Müller Schmied, H. (2020). Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100761. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100761>
- [4] Gorbachova, L. O. (2015). The intra-annual streamflow distribution of Ukrainian rivers in different phases of long-term cyclical fluctuations. *Energetika*, 61(2), 71–80.
- [5] Гребінь, В. В. (2010). *Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз)*. Київ: Ніка-Центр.
- [6] Хільчевський, В. К., Чунарьов, О. В., & Ромась, М. І. (2006). Водогосподарська обстановка в басейні р. Південний Буг та вплив на неї Південно-Українського енергокомплексу. *Меліорація і водне господарство*, 93–94, 63–69.
- [7] Snizhko, S., Didovets, I., Zasiadko, V., Andrusevych, A., & Horodysky, I. (2022). Climate damage caused by Russia's war in Ukraine. *Initiative on GHG accounting of war*. Ecodia, Kyiv.
- [8] Хільчевський, В. К., Чунарьов, О. В., Ромась, М. І., Яцюк, М. В., & Бабич, М. Я. (2009). *Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу*. Київ: Ніка-Центр.

- [9] Магась, Н., & Туз, Р. (2025). Гідрологічні особливості та характеристика водогосподарської діяльності у пониззі річки Синюха. *Екологічна безпека та природокористування*, 53(1), 22–34. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.22-34>
- [10] Магась, Н. І. (2024a). Характеристика природних та кліматичних умов формування гідроecологічного стану в пониззі річки Синюха. *Екологічні науки*, 4(55), 59–69. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.10>
- [11] Магась, Н. І. (2024b). Екологічний стан пониззя річки Синюха. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 30, 35–47. <https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.04>
- [12] Leščešen, I., Gnjato, S., Galinović, I., & Basarin, B. (2024). Hydrological drought assessment of the Sava River basin in South-Eastern Europe. *Journal of Water and Climate Change*, 15(8), 3902–3918. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.157>
- [13] Collignan, J., Polcher, J., Bastin, S., & Quintana-Segui, P. (2025). Identifying and quantifying the impact of climatic and non-climatic drivers on river discharge in Europe. *Water Resources Research*, 61(4), e2024WR038220. <https://doi.org/10.1029/2024WR038220>
- [14] Spinoni, J., Naumann, G., & Vogt, J. V. (2017). Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Global and Planetary Change*, 148, 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.012>
- [15] Ionita, M., & Nagavciuc, V. (2021). Changes in drought features at the European level over the last 120 years. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(5), 1685–1701. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1685-2021>
- [16] Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- [17] Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
- [18] Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed.). Charles Griffin.
- [19] Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
- [20] Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126–135.
- [21] Pohlert, T. (2023). trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection (R package, version 1.1.6). <https://CRAN.R-project.org/package=trend>
- [22] McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc. 8th Conf. Applied Climatology*, 179–183.
- [23] Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the SPEI. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718.
- [24] Spinoni, J., Vogt, J. V., Naumann, G., Barbosa, P., & Dosio, A. (2018). Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology*, 38(4), 1718–1736. <https://doi.org/10.1002/joc.5291>
- [25] Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5, 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- [26] R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. <https://www.R-project.org/>
- [27] Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottensen, G., & Visbeck, M. (Eds.). (2003). *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/134GM01>

© Магась Н. І.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)