УДК 551.58: 519.23: 528.9: 631
DOI https://doi.org/10.32782/wba.2023.2.10

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ ВОДНОГО СЛІДУ ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР НА ВОДОЗБІРНІЙ ТЕРИТОРІЇ РІЧКИ СЛУЧ В УМОВАХ ЗМІН КЛІМАТУ

Пічура В.І. *– д.с.-г.н., професор,*
Потравка Л.О. *– д.е.н., професор,*
Херсонський державний аграрно-економічний університет,
pichuravitalii@gmail.com, potravkalarisa@gmail.com

Водний слід є поширеним та дієвим показником оцінювання водних ресурсів. Кількісна оцінка зеленого водного сліду є важливою для оцінки водних ресурсів на басейновому рівні в умовах змін клімату та дефіциту вологи. Сільськогосподарське господарство є основною галуззю природокористування, яке суттєво впливає на водно-балансову стійкість басейнів річок, оскільки є водоємним, а частка використання водного сліду сягає 86 %. Тому, в умовах змін клімату і нестійкого забезпечення вологою, необхідним є удосконалення системи оцінювання, направленої на раціональне використання водних ресурсів у системі басейнового природокористування, охорони довкілля та покращення якості життєзабезпечення населення. Метою дослідження було проведення розрахунку водного сліду щодо вирощування основних польових культур та визначення обсягів додаткової акумуляції води для забезпечення гідрофункціонування басейну річки Случ на території України в умовах змін клімату. Дослідження ґрунтувалися на даних аналізу кліматичних змін за 1981–2022 рр., дешифруванні актуальних супутникових знімків космічного апарату Sentinel 2 та статистичних даних структури сівозміни на агроландшафтах водозбірної території регіону досліджень. Схема дослідження водозбірної території річки Случ та розрахунок водного сліду вирощування сільськогосподарських культур включає шість логічних блоків організації досліджень: виокремлення водотоків та визначення меж водозбірної території, визначення структури земель басейну річки, дослідження змін клімату, розрахунок балансу водоспоживання та просторово-часової диференціації водного сліду вирощування основних польових культур на основі FAO Penman-Monteith method, розрахунок водно-балансової стійкості басейну річки Случ. Розрахунки обсягів витрат водного сліду здійснено для періодів вегетації основних польових озимих та ярих культур за 2018–2021 рр.: 2018–2019 рр. – середньо вологий рік переходить у посушливий рік; 2019–2020 рр. – посушливий переходить у середньовологий рік; 2020–2021 рр. – середньовологий переходить у вологий рік. Встановлено просторово-часові закономірності формування водного сліду та співвідношенні використання зеленої та синьої води при вирощуванні різних сільськогосподарських культур. Загальний об'єм водного сліду вирощування польових культур за визначеної сівозміни склало: у 2018–2019 рр. – 1991 млн м^3,

2019–2020 рр. – 2440 млн м^3, 2020–2021 рр. – 2363 млн м^3. Загальний об'єм надходження атмосферних опадів за вегетаційний період в межах агроландшафтів водозбірної території річки становило: у 2018–2019 рр. – 3760 млн м^3, 2019–2020 рр. – 4423 млн м^3, 2020–2021 рр. – 4839 млн м^3. Загальний об'єм додаткової акумуляція зеленої (дощової) води за вегетаційний період з агроландшафтів басейну річки склало: у 2018–2019 рр. – 1769 млн м^3 або 47,0% від надходження атмосферних опадів за вегетаційний період (Pv); 2019–2020 рр. – 1983 млн м^3 або 44,8% від Pv; 2020–2021 рр. – 2476 млн м^3 або 51,2 % від Pv. Запропонована схема досліджень та отримані результати є важливими для коригування та обґрунтування водо- та ресурсозберігаючих агротехнологій і сівозмін залежно від кліматичних змін, для визначення водно-балансової стійкості басейну річки у відповідності до показників додаткової акумуляції зеленої води.

Ключові слова: клімат, водний слід, сільське господарство, польові культури, водоспоживання, басейн річки, моделювання, річка Случ.

Постановка проблеми. Зміни клімату є важливим глобальним викликом людства, який потребує міждисциплінарного підходу у його подоланні. Кліматичні зміни проявляються в інтенсивності та частоті кліматичних аномалій, екстремальних погодних явищ на різних рівнях ієрархії у просторі і часі. За останні 30 років значно збільшилася частота та інтенсивність небезпечних погодних явищ [1, 2], які є причиною суттєвих економічного збитку [3], загрожують існуванню басейнових ландшафтних [4] і аквальних екосистем [5, 6], здоров'ю та життю людей [7]. Тому, актуальності набуває збалансоване управління природними ресурсами у розбудові кліматично орієнтоване господарювання [8], розбудова якого потребує вибору особливої просторової одиниці біосфери. У цьому контексті для визначення просторово-часових закономірностей організації та взаємозв'язків стабілізуючих (природне середовище) та дестабілізуючих (антропогенне середовище) компонентів екосистем обрано басейн річки [9, 10]. Зокрема, визначальним фактором формування та гідрофункціонування басейнів є рельєф місцевості та кліматичні характеристики території [11]. Перевищення кількості надходження атмосферних опадів над величиною випаровування та фільтрації води у ґрунті обумовлюють баланс поверхневого стоку води з території водозбору та її акумуляції у руслових системах [12, 13]. Басейн річки – це просторово-часова водно-балансова стійка система, у якій відбувається трансформація атмосферних опадів у інші елементи водного балансу, що забезпечує внутрішню функціонально-цілісну замкнутість міграційних потоків поверхневого та внутрішньоґрунтового стоку вод [14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На басейновому рівні здійснюється найважливіша функція взаємозв'язків складових (біотичних і абіотичних) екосистем, між якими існують генетичні, історичні та функціональні зв'язки, виражені безперервним обміном речовин, енергії та

інформації [15]. Саме річковий басейн виступає в якості цілісної системи з установленими екологічними, соціальними та економічними зв'язками [16]. Також басейн є природно-організованою територіальною одиницею, яка забезпечує можливість установлення істинних просторово-часових закономірностей наслідків і ступінь впливу людської діяльності на деградацію природних екосистем [17].

Закономірності фізичної організації функціонування басейнів визначаються стоком поверхневих вод і стоком твердої речовини, які залежать від кліматичних характеристик та антропогенним навантаженням на водозбір [18]. До основних антропогенних чинників, які визначають рівень гідрофункціонування басейну річки, відносять промисловий комплекс [19], сільське господарство [20] та комунальну галузь [21]. Провідне й найпотужніше за масштабами проявів природокористування є сільське господарство, яке зумовлює масштабну агрогенну трансформацію басейнових ландшафтних структур і значне підвищення ґрунтово-ерозійної міграції високотоксичних і біогенних речовин, погіршує екологічний стан водозбору та ерозійно-руслових систем за межами первинних осередків забруднення [22, 23].

Проблеми сьогодення, зумовлені дефіцитом прісної води, можуть посилитися у майбутньому по причині зростання потреб у водних ресурсах, обмеженні їх доступності та знижені якості. Науковці стверджують, що проблеми доступності водних ресурсів будуть поглиблюватися, що загрожує продовольчій безпеці країн світу та екологічній стійкості природного середовища. Сільське господарство є водоємним, його частка у водному сліду сягає 86 % [24]. Занепокоєння сільськогосподарських виробників викликають кліматичні зміни, які посилюються їх діяльністю [25]. Зокрема, тривалий дефіцит опадів на водозбірній території спричиняє метеорологічну посуху [26], в подальшому проявляється зниженням вологості ґрунту [27], що посилюється випаровуванням стоку і порушує стан екологічної системи басейну річки. Тому, в умовах змін клімату і нестабільного волого забезпечення, важливим питанням є забезпечення збалансованого функціонування водогосподарської та сільськогосподарської галузей, що виражатиметься удосконаленням системи оцінювання та раціонального використання наявних водних ресурсів у землеробстві як складової цілісної системи у структурі басейнового природокористування, охорони довкілля та якості життєзабезпечення на основі сучасних методологій.

Забезпечення збалансованого водокористування на агроландшафтах водозбірної території річки повинно ґрунтуватися на співвідношенні надходження атмосферних опадів та обсягів водних ресурсів [28, 29], необхідних для вирощування сільськогосподарських культур, з вибором опти-

мальної структури сівозміни [30], обґрунтування кліматично орієнтованих та ресурсозберігаючих агротехнологічних заходів [31–33]. Дієвим інструментом об'єктивного оцінювання обсягів водоспоживання та визначення рівня акумуляції дощової води з агроландшафтів водозбірної території річки є розрахунок водного сліду (WF) вирощування основних польових культур сівозміни [34]. Водний слід є інструментом, який дає можливість всебічно оцінити відношення споживача або виробника до використання прісноводних систем [35]. Розрахунок водного сліду дає об'єктивну інформацію щодо використання обсягів води для різних цілей господарювання, є основою для формулювання висновків про стійкість водних ресурсів, їх розподіл, а також оцінку екологічних, соціальних та економічних наслідків на басейновому рівні [36, 37]. Застосування інструменту водного сліду дає можливість: визначити розподіл водних ресурсів у просторі та часі для потреб промисловості, сільського господарства і комунального господарства; оцінити стійкість та ефективність використання водних ресурсів у межах водозбірної території; обґрунтувати стратегічні напрями розвитку водного та сільського господарства на різних рівнях басейнового управління.

Постановка завдання. Встановити просторово-часові закономірності диференціації водного сліду вирощування основних польових культур та обсягів додаткової акумуляції дощової води у басейні річки Случ в умовах змін клімату.

Матеріали і методи досліджень. **Схема і матеріали досліджень.** Схема дослідження водозбірної території річки Случ та розрахунок водного сліду вирощування сільськогосподарських культур включає шість логічно-послідовних блоків організації досліджень (рисунок 1).

Для виділення водотоків, визначення їх порядків і встановлення меж водозбірної території басейну річки Случ була використана цифрова модель рельєфу (ЦМР) на основі даних *SRTM*-90 із просторовою роздільною здатністю 90×60 м/піксель, яка була представлена на офіційному сайті геологічної служби США (https://earthexplorer.usgs.gov/). Дослідження виконано за допомогою програми *ArcGIS* на основі ЦМР з використанням удосконаленого алгоритму [9, 14] гідрологічного геомоделювання робочого модуля Hydrologytools of Spatial Analyst Tools. Для поділу річкового басейну на групи, в взалежності від порядку головного русла, використано підхід Стралера-Філософова [38].

Структура земель басейну Случ розрахована на основі даних супутникового знімку космічного апарату Sentinel 2 (роздільна здатність 10 м/піксель) станом на 15–16.10.2022 р. із застосуванням методу «land use land cover (LULC)» of *ArcGIS*. Просторово-часові закономірності зміни кліматичних умов на водозбірній території басейну річки у період

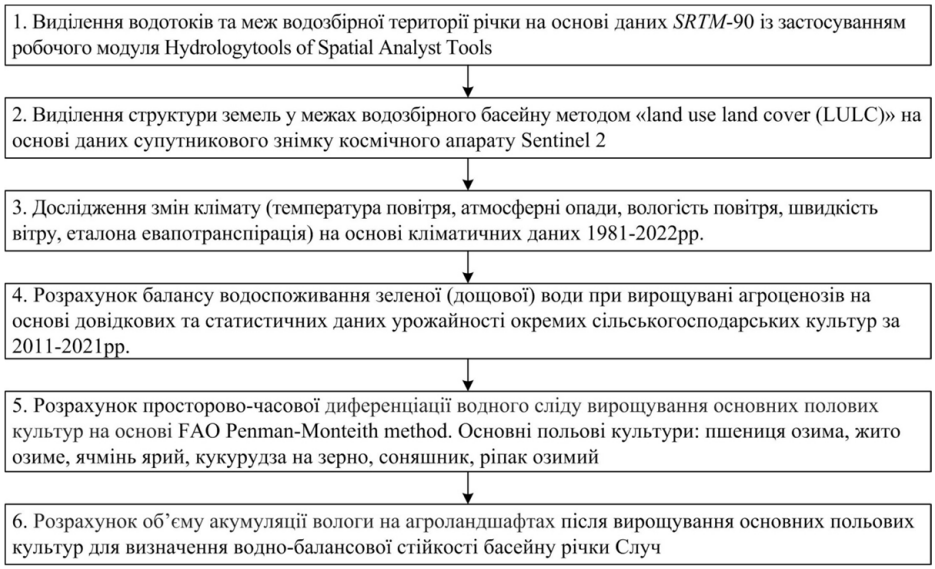


Рис. 1. **Структурно-логічна методологічна схема дослідження водозбірної території річки Случ та розрахунку водного сліду вирощування сільськогосподарських культур**

1981–2022 рр. встановлені на основі даних NASA POWER (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/). Для розрахунку евапотранспіраційних процесів використано довідкові дані FAO (https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents)

Коефіцієнти водоспоживання основних польових сільськогосподарських культур за різних умов природного зволоження взяті із статистичних довідників для типових фізико-географічних умов Полісся України (http://agro-business.com.ua/ahrarni-kultury/item/16506-systema-povnoho-zabezpechennia-posiviv-volohoiu-za-umov-zroshennia.html), які відповідають умовам вирощування агроценозів у межах басейну річки Случ.

Характеристика території досліджень. Річка Случ бере початок з невеликого озера, що живиться підземними водами, розташованого в балці і 1 км на схід села Червона Случ Хмельницької області України на висоті 320 м над рівнем моря (рисунок 2). Річка Случ впадає з правої притоки до річки Горинь у межах села Лютинськ Рівненської області. Загальна довжина річки складає 451 км, площа водозбірного басейну становить 13,83 тис. км^2, падіння русла 183 м (рисунок 2*б*).

Висоти рельєфу у межах басейн річки від її витоку до гирла змінюється від 376 м до 137 м (рисунок 2*в*), середній ухил водної поверхні рівний, 0,4 %. Верхня частина басейну являє собою підвищену рівнину, розчленовану врізаними річковими долинами довжиною 50–100 м та

густою ярово-балковою мережею. Середня густина річкової мережі складає 0,39 км/км^2, у верхній частині басейну Случ, густина річкової мережі сягає 0,7 км/км^2. Морфометрія басейну має витягнуту з півдня на північ форму, довжиною 300 км, із середньою та найбільшою шириною відповідно 46 км та 110 км. Територія водозбору річки розташована у двох геоморфологічних областях, а саме: верхня і середня частини басейну знаходяться на Волинсько-Подільській височині та її відрогах, яка має назву Волинське полісся; нижня частина водозбору знаходиться у межах великої рівнини Полісся (Прип'ятське Полісся).

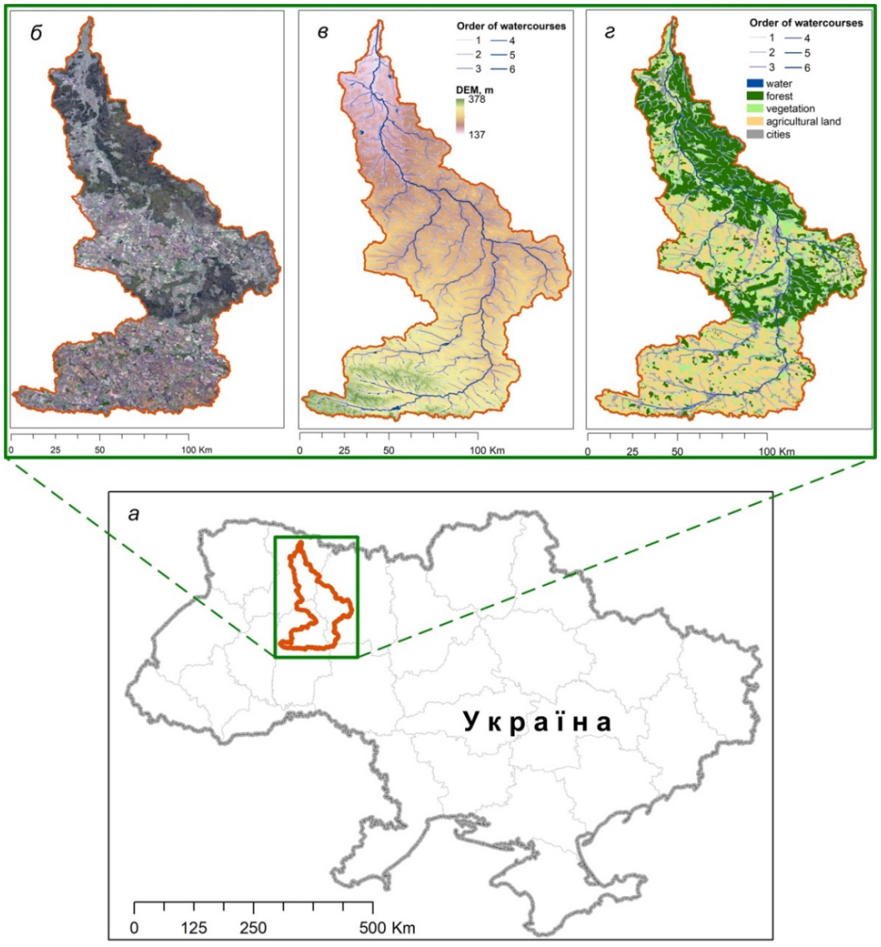


Рис. 2. **Просторове розміщення та характеристика басейну річки Случ:**
а – розміщення на території України; б – супутниковий знімок з космічного апарату Sentinel 2 станом на 15–16.10.2022 р.; в – цифрова модель рельєфу та розподіл гідромережі в межах басейну; г – структура земельних угідь

Русло річки звивисте, подекуди має круті береги з висотами від 20–40 м до 50 м, місцями береги помірно круті, рідше пологі з висотами 5–15 м. Долина сягає ширини 1,5–5,0 км у нижній течії. Заплава двостороння, поросла лучною рослинністю, місцями заболочена. Лісистість басейну становить – 30,8 %, інша рослинність (луки, ремізи, полезахисні лісосмуги, рослинність на ярово-балкових землях) – 10,7 %, заболоченість – 13,0 %, водойми – 0,3 %, сільськогосподарські угіддя – 39,7 %, населені пункти – 5,4 % (рисунок 2*г*).

На річці Случ, у місті Новоград-Волинському, побудоване водосховище з об'ємом води 1,8 млн м^3 (площею 95,5 га), яке використовується для господарської діяльності і комунального господарства. Споживання води становить 1,96 млн м^3/рік [39]. Річка Случ використовується як джерело гідроенергії (Миропільська ГЕС, Любарська ГЕС, Пединківська ГЕС). Ставки у межах басейну Случ мають рибогосподарське призначення. Розподіл стоку протягом року нерівномірний, залежить від кількості надходження атмосферних опадів та температурного режиму повітря. Більша частина стоку фіксується у період весняної повені, у межах 40–80 % річкового стоку. У літню межень річка переважно живиться підземними водами [40]. У літньо-осінній період часто спостерігаються дощові паводки. Найбільший запас води у снігу рівний 102 мм, середній – 47 мм, забезпечений на 10 % – 86 мм, на 25 % – 65 мм. Сума річних опадів для 50 % років досліджень становить 562 мм, для 75 % – 481 мм, для 95 % років – 401 мм. Швидкість течії річки при проходженні максимальних втрат води досягає 1,0–1,4 м/с, в межень середні швидкості складають 0,3-0,5 м/с. Мінералізація поверхневих вод у середньому становить: у весняну повінь – 313 мг/дм^3; літньо-осінню межень – 321 мг/дм^3; зимову межень – 349 мг/дм^3. За комплексною екологічною оцінкою в період 2005–2021 років, якість поверхневих вод р. Случ у більшості випадків відбору проб вода віднесено до ІІ класу – стан «добрий», з перевищенням вмісту азоту нітратного, показника БСК$_5$ (біохімічного споживання кисню в продовж п'яти днів) та фосфору фосфатів [41], що свідчить про присутність у складі води досліджуваної річки біогенних елементів антропогенного походження.

Метод розрахунку евапотранспірації культури (ET$_c$). Просторово-часова диференціація евапотранспірації зеленої та синьої води у період вирощування основних польових сільськогосподарських культур розрахована на основі FAO Penman-Monteith method, який ґрунтується на обчисленні еталонної евапотранспірації (ET_o) та подальшого розрахунку евапотранспірації культури (ET_c) з урахуванням коефіцієнту її урожайності (K_c).

FAO Penman-Monteith method – єдиний стандартний метод для обчислення ET_o на основі метеорологічних даних:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

де ET_o – еталонна евапотранспірація, мм/добу; R_n – чиста радіація на поверхні посіву, МДж/м² на добу; G – щільність теплового потоку ґрунту, МДж/м² на добу; T – температура повітря на висоті 2 м, °С; u_2 – швидкість вітру на висоті 2 м, м/с; e_s – тиск насиченої пари, kPa; e_a – фактичний тиск пари, kPa; $e_s - e_a$ – дефіцит тиску насиченої пари, kPa; Δ – нахил кривої тиску пари, kPa/°С; γ – психрометрична константа, kPa/°С.

Показник ET_o розраховується на основі кліматичних параметрів, відображає випаровування у певному регіоні в конкретний період року. але не враховує особливості врожаю та характеристики ґрунту. Евапотранспірація культури (ET_c) відрізняється від еталоної евапотранспірації (ET_o) тим, що включає аеродинамічні властивості стійкості урожаю сільськогосподарських культур (K_c). Значення K_c змінюється в залежності від конкретних характеристик культури і лише певною мірою залежить від клімату.

Показник евапотранспірації культури (ET_c) розраховується за формулою:

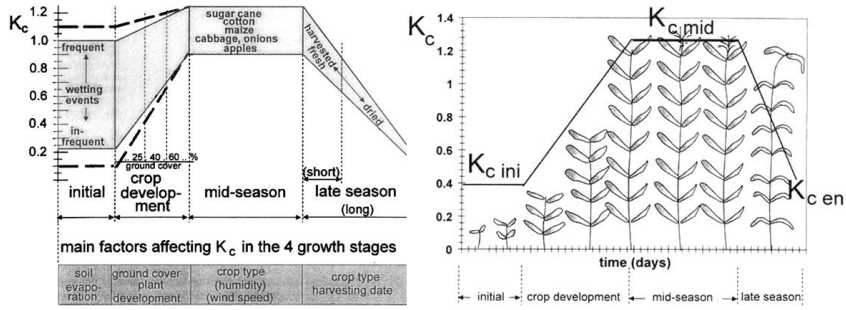
$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (2)$$

Значення евапотранспірації культури ET_c розраховується за умови виключення таких факторів: швидкість росту рослин сільськогосподарських культур, ґрунтові води та засолення, густота висіву насіння, наявність шкідників та хвороб, забур'янення, родючість ґрунтів. У коефіцієнт K_c інтегровано значення характеристик транспірації певної культури та усереднені ефекти випаровування з ґрунту.

Розрахунок ET_c складається з чотирьох етапів, а саме:

1. Визначення стадій росту певних культур. Під час розвитку культури змінюється ґрунтовий покрив, висота культури та площа листя. Через відмінності у випаровуванні на різних стадіях росту, значення K_c для певної культури змінюватиметься протягом вегетаційного періоду, який, відповідно до методики FAO Penman-Monteith, розділяють на чотири фенологічні стадії розвитку (рисунок 3*а*): L_{ini} – initial, L_{dev} – crop development, L_{mid} – mid-season, L_{late} – late season. Кожна культура має власну тривалість окремого вегетаційного етапу розвитку відповідно до строків сівби та регіону вирощування. Типові терміни окремих фенологічних стадій розвитку рослин наведено у джерелах FAO (https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e0b.htm#TopOfPage). Зокрема, для опису та побудови кривої коефіцієнтів урожаю потрібні три значення ((рисунок 3*б*) K_c): на початковій стадії (K_{c_ini}), у середині сезону (K_{c_mid}), наприкінці сезону (K_{c_and}).

У таблиці 1, відповідно до градації FAO, наведено типові значення коефіцієнтів урожаю для різних сільськогосподарських культур, які мають



а *б*

Рис. 3. **Основні фенологічні стадії розвитку рослин для розрахунку K_c:**
а – очікувані типові діапазони Kc для чотирьох стадій росту; б – узагальнена крива коефіцієнтів урожаю для підходу з однокультурним коефіцієнтом

більшу частку у сівозміні регіону досліджень. Коефіцієнти, які належать до однієї групи культур, зазвичай схожі, оскільки висота рослин, площа листя, покриття ґрунту та управління водними ресурсами майже однакові.

2. Коригування вибраних коефіцієнтів K_c для частоти зволоження або кліматичних умов впродовж вегетації рослин. Значення K_c на початковій стадії та стадії розвитку культури залежать від впливу сили коливань частоти зволоження території вирощування, тому слід уточнювати значення коефіцієнту K_{c_ini}. Значення K_{c_mid} і K_{c_and} коригуються відповідно до погодних умов регіону досліджень за фактичними даними середнього значення швидкості вітру (u_2, m/s) та відносної вологості повітря (RH_{min}, %) на території вирощування певних сільськогосподарських культур.

Коригування коефіцієнтів здійснюється за формулою:

$$K_{c_(mid\ or\ end)} = K_{c_(mid\ or\ end)(Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (3)$$

де $K_{c_(mid\ або\ end)\ (Tab)}$ – значення для *Kc_mid* і *Kc_end* взяті з таблиці 1; u_2 – середнє значення добової швидкості вітру на висоті 2 м над травою в період середнього та пізнього сезону росту (м/с), для 1 м/с $\leq u_2 \leq$ 6 м/с; RH_{min} – середнє значення добової мінімальної відносної вологості протягом середньої та пізньої фази росту (%), для 20% $\leq RH_{min} \leq$ 80%; h – середня висота рослин у середньому та пізньому сезоні (м) для 0,1 м < h < 10 м.

Для стадії пізніх сезонів коригування не проводиться, якщо $K_{c_end\ (Tab)}$ < 0,45 (тобто $K_{c_end} = K_{c_end\ (Tab)}$).

Якщо немає даних щодо u_2 або RH_{min}, можна використовувати загальну класифікацію даних швидкості вітру та вологості, наведену в таблиці 2.

3. Побудова кривої коефіцієнтів урожаю дозволяє визначити значення K_c для будь-якого вегетаційного періоду. Для опису та побудови

Таблиця 1. **Коефіцієнти окремої культури (K_c) і середня максимальна висота рослини для культур без стресу у субгумідному кліматі ($RH_{min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2$ м/с) для використання у FAO Penman-Monteith ET_o**

Культура	Максимальна висота культури (h), м	K_{c_ini}	K_{c_mid}	K_{c_and}
Пшениця озима	1,0	0,40	1,15	0,25
Жито озиме	1,0	0,40	1,15	0,25
Пшениця яра	1,0	0,30	1,15	0,25
Ячмінь ярий	1,0	0,30	1,15	0,25
Кукурудза на зерно	2,0	0,30	1,20	0,35
Соняшник	2,0	0,35	1,00	0,35
Ріпак озимий	0,6	0,35	1,00	0,35

Таблиця 2. **Емпіричні оцінки місячних даних швидкості вітру (u_2) і типових значень RH_{min} порівняно з RH_{mean} для загальних кліматичних класифікацій**

Сила вітру	u_2, m/s	Класифікація клімату	RH_{min}, %	RH_{mean}, %
Light wind – легкий	≤ 1,0	Arid – сухий	20	45
Light to moderate wind – слабкий та помірний	2,0	Semi-arid – напів-сухий	30	55
Moderate to strong wind – від помірного до сильного	4,0	Sub-humid – помірно вологий	45	70
Strong wind – сильний	≥ 5,0	Humid – вологий	70	85
General global conditions – загальні глобальні умови	2,0	Very humid – дуже вологий	80	90

кривої K_c потрібні лише три значення K_c. Розділіть період вегетації на чотири загальні стадії росту, які описують фенологію або розвиток культури (початкова стадія, розвиток культури, середина сезону та пізня стадія сезону), визначте тривалість стадій росту та визначте три значення K_c, які відповідають K_{c_ini}, K_{c_mid} і K_{c_end}.

4. Обчислення ET_c за формулою 2. Після отримання значень K_c розраховується евапотранспірація культури (ET_c), здійснюється шляхом множенням значення K_c на відповідні значення ET_o.

Коефіцієнт K_c для будь-якого періоду вегетації можна отримати за умови, якщо протягом початкової та середньої фази значення K_c є постійним і дорівнює значенню K_c фази росту рослини, яка досліджується. Під час розвитку культури та пізньої стадії сезону, K_c змінюється лінійно між значеннями Kc наприкінці попередньої стадії (K_{c_prev}) і K_c на початку наступної стадії (K_{c_next}), яка дорівнює K_{c_end} у випадку пізньої стадії сезону:

$$K_{ci} = K_{cprev} + \left[\frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{stage}}\right](K_{cnext} - K_{cprev}) \quad (4)$$

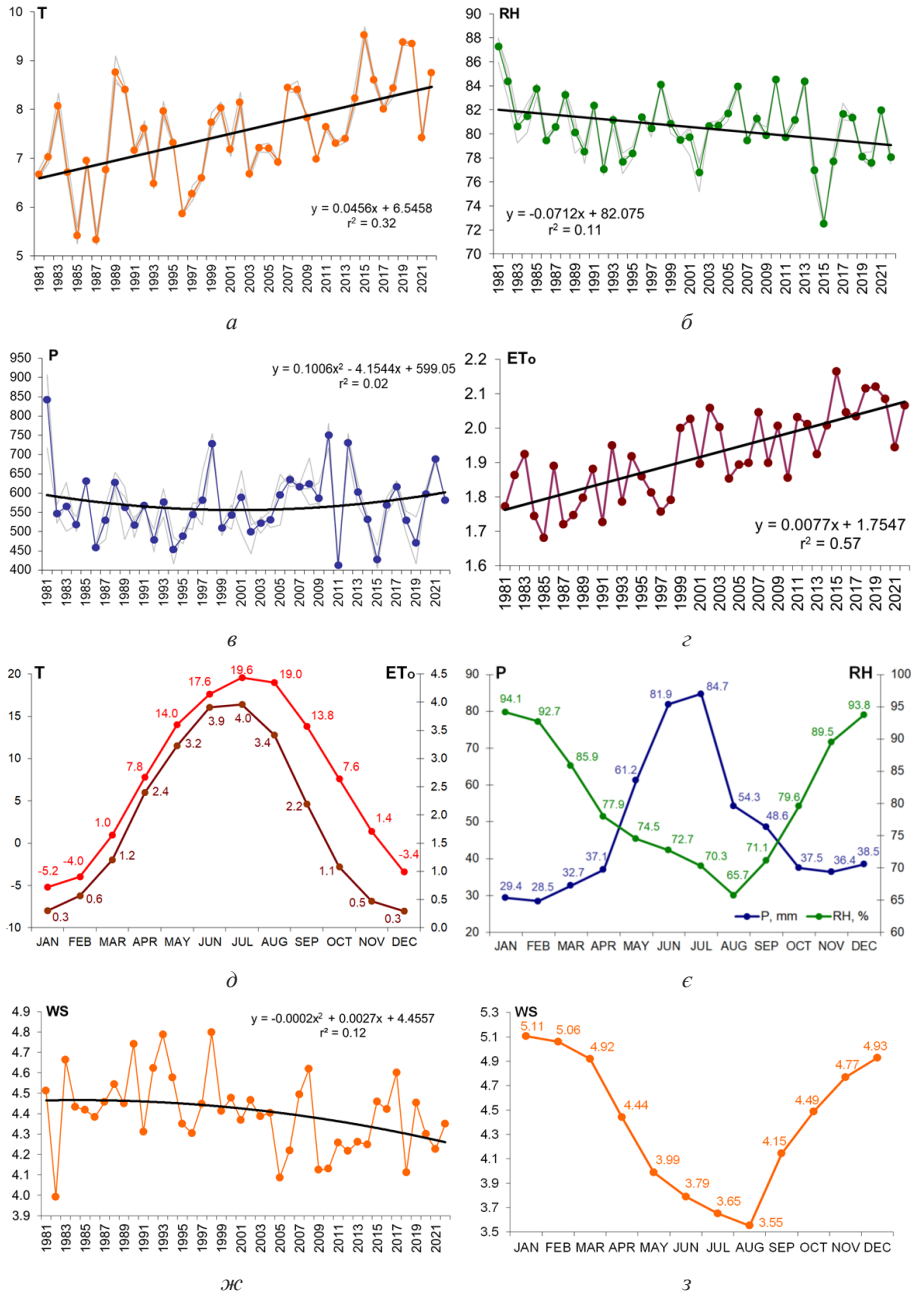
де i – номер дня протягом вегетаційного періоду, L – тривалість вегетаційного періоду; K_{ci} – коефіцієнт урожаю на добу i; L_{stage} – тривалість етапу, що розглядається, діб; $\sum (L_{prev})$ – сума тривалості всіх попередніх етапів, діб.

Обробку космічних знімків, створення картограм, просторово-часовий, кореляційний та регресійний аналізи проводили з використанням ліцензійного програмного продукту ArcGis 10.6 та Microsoft Excel 2010.

Результати дослідження та їх обговорення. Дослідження змін клімату. Останні 40 років характеризуються формуванням нових кліматичних умов із вираженим зростанням температурного режиму і асинхронною зміною атмосферних опадів, які обумовлюють дефіцит вологи, зниження рівня кругообігу речовин у екосистемах басейну річки Случ, використання кліматичностійкої селекції у рослинництві та застосування вологозберігаючих технологій землеробства з метою отримання стабільних урожаїв та збереження ґрунтової вологи. Кліматичні умови певного року формують об'єм використання зеленого водного сліду, який визначається як сума зеленої води, що випарувалася, та зеленої води, яка була спожита рослиною впродовж життєвого циклу. Рівень споживання рослинами та випаровування зеленої води залежать від кількості надходження атмосферних опадів, зміни температури повітря і швидкості вітру впродовж вегетаційного періоду агроценозу. Тому, дослідження динаміки споживання зеленої води на незрошуваних землях, зайнятих під основними польовими культурами, здійснено для років із різним рівнем вологозабезпечення у межах басейну річки Случ в період 1981–2022 рр. Цей період спостережень характеризується підвищенням середньорічної температури повітря від 6,6 °С до 8,5 °С (рисунок 4*а*) і нестабільним надходженням атмосферних опадів зі збільшення варіації від 11 % до 16 % (рисунок 4*в*), що обумовило зниження середньорічного значення вологість повітря від 86 % до 79 % (рисунок 4*б*) та підвищення еталонної евапотранспірації на 0,3 мм/добу (рисунок 4*г*).

За результатами кореляційного аналізу впливу основних кліматичних показників на зміну значення еталонної евапотранспірації (ET_o) встановлено, що головним кліматичним компонентом диференціації ET_o є температура повітря. Рівень кореляції середньорічних значень T і ET_o складає 0,79, середньомісячних становить 0,95. Також виявлено закономірність зміни RH і ET_o, для середньорічних значень кореляція рівна – 0,35, а середньомісячних – 0,91.

Розрахунок середньорічного значення ET_o на основі метеорологічних даних:



а *б* *в* *г* *д* *є* *ж* *з*

Рис. 4. **Кліматичні характеристики водозбірної території річки Случ за період 1981–2022 рр.:** а – середньорічна температура повітря (T), °C; б – середньорічна вологість повітря (RH), %; в – сума атмосферних опадів за рік (P), мм; г – еталонної евапотранспірації (ET_o), mm/day; д – середньомісячне значення T і ET_o; є – середньомісячне значення P і RH; ж – середньорічна швидкість вітру (WS), м/с; з – середньомісячне значення WS

$$ET_o = \begin{cases} 0{,}0993T + 1{,}1725; & r = 0{,}79,\ r^2 = 0{,}62 \\ -0{,}0275RH + 4{,}1333; & r = 0{,}35,\ r^2 = 0{,}59 \\ -0{,}13 \cdot 10^{-3}P + 0{,}096T + 1{,}2721; & r = 0{,}79,\ r^2 = 0{,}63 \\ -0{,}02972RH - 0{,}19826WS + 5{,}1863; & r = 0{,}66,\ r^2 = 0{,}44 \end{cases} \quad (5)$$

Розрахунок середньомісячного значення ET_o на основі метеорологічних даних:

$$ET_o = \begin{cases} 0{,}1462T + 0{,}8324; & r = 0{,}95,\ r^2 = 0{,}90 \\ -0{,}1289RH + 12{,}318; & r = 0{,}91,\ r^2 = 0{,}83 \\ 0{,}02306P + 0{,}10557T + 0{,}03783; & r = 0{,}96,\ r^2 = 0{,}92 \\ -0{,}00774RH - 2{,}27485WS + 12{,}5608; & r = 0{,}95,\ r^2 = 0{,}90 \end{cases} \quad (6)$$

За методикою FAO у розрахунку значень еталонної евапотранспірації (ET_o) уточнено евапотранспірацію культур (ET_c) та проведено подальший розрахунок споживання зеленої води за окремими видами культур впродовж життєвого циклу та встановлено важливість показника швидкості вітру (*WS;* u_2) та відносної вологості повітря (*RH*). Для водозбірної території річки Случ встановлено високу ступінь кореляції двохфакторної моделі розрахунку ET_o залежно від *RH* і *WS*, направленої на розрахунок середньорічних значень ET_o Рівень апроксимації моделі складає 0,44, середньомісячне значення *(ETo)* – 0,90. Запропоновані регресійні моделі є оптимальними для розрахунку просторово-часової диференціації ET_o в межах водозбірної території річки Случ на основі різних вхідних кліматичних даних.

Сезонні характеристики кліматичних змін (рис. 4*д, є, з*) є необхідними для визначення коефіцієнту урожайності (K_c), розрахунку евапотранспірації культури (ET_c) та водного сліду (*WF*, м^3/рік) при вирощуванні основних сільськогосподарських культур у межах басейну річки Случ.

Баланс водоспоживання зеленої (дощової) води при вирощуванні агроценозів на основі довідкових та статистичних даних урожайності окремих сільськогосподарських культур. У структурі земель України на 2020 рік частка сільськогосподарських земель складала 68,7 % (41,4 млн га), у тому числі: рілля 79,0 % (32,7 млн га), пасовища – 12,8 % (5,3 млн га), сіножаті – 5,56 % (2,3 млн га), багаторічні насадження – 2,17 % (0,9 млн га), перелоги – 0,47 % (0,2 млн га). У структурі сільськогосподарських угідь 53,4 % посівних площ зайнято зерновими та зернобобовими культурами, в тому числі: пшениця – 23,8 %, ячмінь – 9,0 %, кукурудза на зерно – 16,6 %. Під технічними культурами зайнято 33,5 % посівних площ: соняшник – 22,4 % та ріпак – 3,6 %. Близько 13,1 % посівних площ зайняті іншими культурами.

Водоспоживання сільськогосподарських культур залежить від біологічних особливостей рослин, урожайності, ґрунтово-кліматичних та організаційно-технічних умов. Коефіцієнт водоспоживання переважно

залежить від ґрунтово-кліматичних умов зони вирощування агроценозів та рівня природного вологозабезпечення у вегетаційний період. Зокрема, залежно від рівня зволоження року, водоспоживання рослин для формування однієї тони товарної продукції у зоні Полісся становить: для озимих зернових від 350–450 м³/т у вологі роки до 500–550 м³/т у посушливі роки, ярових зернових від 375–435 м³/т до 500–530 м³/т, технічних культур від 480–615 м³/т до 685–720 м³/т (таблиця 3). Таким чином, у посушливі роки рівень водоспоживання культур зростає у 1,2–1,3 рази, що обумовлюється посиленням інтенсивності евапотранспіраційних процесів. Такі умови характерні для вирощування основних полових культур на водозбірній території річки Случ.

Таблиця 3. **Коефіцієнти водоспоживання основних сільськогосподарських культур у зоні Полісся України залежно від зволоження року, м³/т**

Культура	Вологий рік	Середній рік	Посушливий рік
Пшениця озима	350–450	450–500	500–525
Жито озиме	400–425	425–450	450–550
Пшениця яра	400–435	435–465	465–500
Ячмінь ярий	375–425	425–500	500–530
Кукурудза на зерно	265–335	335–375	375–395
Соняшник	480–615	615–685	685–720
Ріпак озимий			

У зоні Лісостепу водоспоживання сільськогосподарських культур на одиницю продукції збільшується у 1,30–1,45 рази, зокрема: озимі зернові у 1,30–1,40 рази, ярі зернові у 1,40–1,45 рази, кукурудза на зерно у 1,38–1,40 рази, технічні культури у 1,30–1,40 рази. В свою чергу у зоні Степу водоспоживання агроценозів збільшується у 2,0 рази.

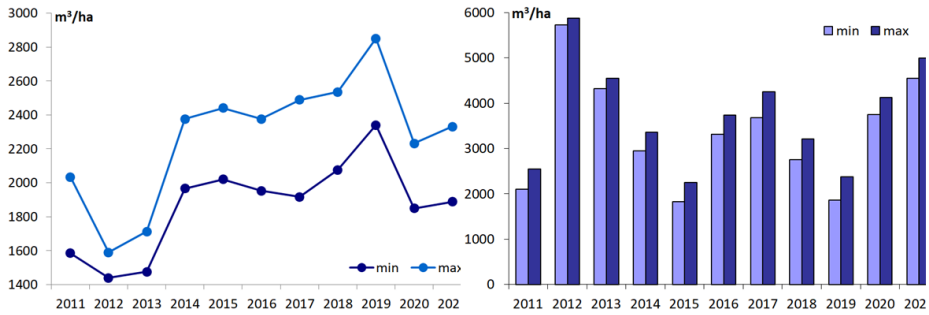
Довідкові коефіцієнти водоспоживання (м³/т) рослин, визначені відповідно до умов вологозабезпечення року (м³/га) і статистичні дані урожайності (т/га) надають можливості розрахувати обсяги споживання зеленої води для вирощування сільськогосподарських культур у сівозмінах регіону. Розрахунок водоспоживання зеленої води для вирощування основних польових культур у межах басейну річки Случ здійснено за даними Державної служба статистики України (https://www.ukrstat.gov.ua/). Для цього було приведено до середнього значення урожайність сільськогосподарських культур Хмельницької та Житомирської областей, агроландшафти яких входять до водозбірної території річки Случ. Статистичні дані урожайності та споживання зеленої води основних польових культур в залежності від кліматичних характеристик року представлено у таблиці 4.

Таблиця 4. **Урожайність (т/га) та водоспоживання зеленої води (м³/га) основних польових культур у межах басейну річки Случ за 2011–2021 рр.**

Рік		Культури					
		Пшениця	Ячмінь ярий	Жито озиме	Кукурудза на зерно	Соняшник	Ріпак озимий
2011	т/га	3,2–4,5	2,5–3,3	1,9–2,9	6,6–7,8	1,8–2,0	1,5–2,2
	м³/га	1636–2288	1303–1700	955–1445	2541–3007	1230–1413	1040–1554
2012	т/га	3,5–4,3	3,0–3,7	2,2–2,7	7,3–7,4	1,9–2,0	2,3–2,4
	м³/га	1380–1720	1196–1464	890–1121	2187–2229	1047–1091	1282–1293
2013	т/га	3,2–4,2	2,7–3,3	2,0–2,7	7,9–8,9	2,2–2,3	2,5–2,8
	м³/га	1292–1672	1080–1304	832–1108	2376–2664	1206–1255	1343–1551
2014	т/га	4,1–5,5	3,8–4,7	2,5–3,6	7,8–8,3	2,2–2,7	2,7–3,4
	м³/га	1933–2627	1750–2181	1082–1586	2780–2939	1456–1775	1781–2217
2015	т/га	4,5–5,8	4,0–4,7	2,8–3,9	5,3–6,0	2,6–2,9	2,6–3,3
	м³/га	2309–2996	2060–2431	1420–1935	2056–2325	1793–2004	1800–2348
2016	т/га	4,7–5,8	3,9–4,9	2,8–4,8	7,3–7,8	2,6–3,2	1,9–2,9
	м³/га	2214–2736	1810–2273	1240–2094	2584–2780	1716–2087	1261–1853
2017	т/га	4,3–6,2	3,5–5,3	2,8–5,7	6,6–7,8	2,4–3,1	3,0–3,2
	м³/га	2052–2945	1625–2454	1235–2501	2343–2773	1554–2015	1944–2093
2018	т/га	4,3–5,7	3,3–4,5	2,5–4,4	9,2–9,9	2,5–3,2	2,7–3,3
	м³/га	2043–2684	1537–2093	1113–1945	3270–3511	1638–2054	1749–2171
2019	т/га	4,3–4,7	3,5–4,3	3,2–4,0	6,5–7,9	2,4–3,2	2,2–2,8
	м³/га	2215–2420	1680–2065	1600–2000	2505–3045	1690–2250	1550–1970
2020	т/га	4,9–5,9	3,7–4,5	3,4–4,4	8,4–9,8	2,5–3,3	2,8–3,2
	м³/га	2330–2805	1670–2030	1480–1920	2940–3430	1625–2145	1820–2080
2021	т/га	5,0–6,4	4,1–4,7	3,6–5,2	8,2–11,2	2,8–3,8	3,0–3,6
	м³/га	2000–2560	1720–1975	1490–2160	2450–3360	1540–2100	1650–1980

Одержані результати дозволяють окреслити рівень коливання змін витрат зеленої води на формування продуктивності окремих сільськогосподарських культур, визначити витрати зеленої води (м³/га) на інші господарські потреби та гідрофункціонування водозбірної території. Визначено циклічність підвищення водоспоживання сільськогосподарських культур (рисунок 5*а*) в залежності від кліматичних умов певного року (рисунок 4).

Значення водоспоживання розраховано відповідно до співвідношення насиченості сівозміни зерновими і технічними культурами регіону досліджень (65:35 %). З урахуванням динамічних змін атмосферних опадів та постійного підвищення температури повітря за останні 11 років найбільший обсяг споживання зеленої води на вирощування основних польових культур у межах водозбірної території річки Случ зафіксовано у 2019 році: від 2340 м³/га до 2850 м³/га, а мінімальне значення зафіксовано у 2012, 2013 і 2021 роках, в межах 1440–1590 м³/га, 1475–1715 м³/га



а *б*

Рис. 5. **Баланс водоспоживання зеленої води сільськогосподарськими культурами в межах басейну річки Случ:**

а – середньозважене значення коефіцієнту водоспоживання на 1 га (м³/га); б – акумуляція зеленої води (м³/га) на забезпечення водно-балансової стійкості басейну річки

та 1890–2330 м³/га відповідно. У посушливі 2011, 2015 і 2019 роки, які характеризувалися дефіцитом надходження атмосферних опадів, акумуляція зеленої води (м³/га) на водозбірної території варіювала від 1830 м³/га до 2545 м³/га (рисунок 5*б*). Вологі роки: 2012, 2013 і 2021 рр., цей показник становить в межах 4315–5875 м³/га. Визначено, що частка споживання агроценозами надходження дощової води у посушливі роки варіювала у межах 38,4–60,5 %, середньо вологі роки – 31,0–48,0 %, вологі роки – 19,7–34,0 %. Загальний об'єм споживання зеленої води на агроландшафтах басейну річки, у розрахунку частки сільськогосподарські угіддя (39,7 % (549,05 тис. га)) в період 2011–2021 рр. склав 1005–1565 млн м³, у посушливі роки – 1110–1565 млн м³, середньовологі – 1015–1390 млн м³, вологі роки – 790–1280 млн м³. Запропонований підхід та результати розрахунку варто використовувати для визначення тенденцій споживання зеленої води при вирощувані основних польових культур певного регіону досліджень. Запропонований підхід не враховує перебіг вегетаційного розвитку рослин та просторово-часові зміни евапотранспіраційних процесів вирощування культур у межах водозбірної території. Тому, деталізований розрахунок водного сліду варто здійснювати на основі даних природного вологозабезпечення та водоспоживання у період вегетації рослин з урахуванням евапотранспіраційних процесів.

Диференціація водного сліду при вирощуванні основних полових культур та розрахунок об'єму акумуляції вологи в межах басейну Случ. Озимі культури мають 2 періоди активної вегетації: осінній (45–50 діб: кінець вересня – кінець листопада) і весняно-літній (75–100 діб: кінець березня – початок липня). Між цими періодами рослини перебувають у стані спокою або зимового анабіозу. Повний вегетаційний період пшениці озимої триває

від 180 до 215 діб. Вегетаційний період у ярових зернових культур коротший, ніж в озимих: у ячменю ярого – 80–105 діб (початок березня – кінець червня), пшениці ярої – 85–105 діб (початок березня – початок липня), а кількість елементів живлення, що витрачається на формування врожаю, у них майже однакова. Коренева система ярих зернових культур слабша, процес кущіння гірший. Ці особливості потрібно враховувати для забезпечити повноцінного живлення рослин упродовж вегетації. Вегетаційний період соняшнику в середньому триває 100–120 діб (кінець квітня, початок травня – кінець серпня, початок вересня). Вегетаційний період ріпаку озимого (осінній і весняно-літній) триває 180–225 діб (кінець серпня – початок липня). Тривалість вегетаційного періоду кукурудзи на зерно в зоні Полісся складає від 150 до 170 діб (кінець квітня і початок травня – кінець серпня і початок вересня). Ці періоди необхідно враховувати для уточнення коефіцієнту урожайності (K_c) та коректного розрахунку евапотранспірації культури (ET_c) та водного сліду (WF). Високі температури прискорюють дозрівання культури і скорочують на 8,0–24,0 % термін вегетаційного періоду, підвищують евапотранспіраційні процеси та знижують рівень грантової вологи. У вегетаційний період вологозабезпечення сільськогосподарських культур на 60–70 % здійснюється атмосферними опадами, на 30–40 % – запасами вологи в ґрунті. Відповідну закономірність слід враховувати при розрахунку водного сліду, який складається із «зелених» та «синіх» водних ресурсів, тобто «дощової» та «ґрунтової або поверхневої» води, які випаровуються під час вирощування сільськогосподарських культур.

Відповідно до узагальнених даних FAO, терміни основних фенологічних стадій розвитку рослин, які відносяться до переліку основних польових культур та наближених умов вирощування у межах водозбірної території Случ, складають: для пшениці озимої із вегетаційним періодом 180 діб, у тому числі L_{ini} – 20 діб, L_{dev} – 60 діб, L_{mid} – 70 діб, L_{late} – 30 діб; жита озимого – дані відсутні; ярової пшениці та ячменю із вегетаційним періодом 120 діб, в тому числі L_{ini} – 15 діб, L_{dev} – 25 діб, L_{mid} – 50 діб, L_{late} – 30 діб; кукурудза на зерно із вегетаційним періодом 125 діб, у тому числі L_{ini} – 20 діб, L_{dev} – 35 діб, L_{mid} – 40 діб, L_{late} – 30 діб; соняшника із вегетаційним періодом 130 діб, у тому числі L_{ini} – 25 діб, L_{dev} – 35 діб, L_{mid} – 45 діб, L_{late} – 25 діб; ріпаку озимого – дані відсутні. Наведені дані не відповідають точній характеристиці терміну вегетації та фенологічних фаз розвитку основних польових культур для території досліджень. Тому, у таблиці 4 представлено тривалість етапів фенологічного розвитку сільськогосподарських культур та строків сівби відповідно до кліматичних умов водозбірної території річки Случ.

Із підвищенням температури повітря та нестабільним надходженням атмосферних опадів в останні роки формуються нові кліматичні

умови вирощування сільськогосподарських культур та об'єми водоспоживання. Тому, дослідження і розрахунок об'ємів витрат зеленої та синьої води здійснено на прикладі нових умов формування клімату із різним рівнем природного зволоження та евапотранспіраційних процесів, а саме: 2019 рік – посушливий рік із високим рівнем евапотранспірації (P = 741 мм, T = 9,4 °C, ET_o = 2,12 мм/добу); 2020 рік – середньовологий рік (P = 595 мм, T = 9,3 °C, ET_o = 2,09 мм/добу); 2021рік – вологий рік із низьким рівнем евапотранспірації (P = 690 мм, T = 7,4°C, ET_o = 1,95 мм/добу).

Для розрахунку об'ємів водного сліду було обрано періоди вегетації основних польових культур в період 2018–2021 рр. (таблиця 5). Озимі культури: 2018–2019 рр. – середньовологий переходить у посушливий рік; 2019–2020 рр. – посушливий переходить у середньовологий рік; 2020–2021 рр. – середньовологий переходить у вологий рік.

На рисунку 6 представлено розподіл значень кліматичних характеристик у вегетаційні періоди 2018–2021 рр. для визначення та коригування значення коефіцієнту урожайності культури (*Kc*) відповідно до методики FAO Penman-Monteith ET_o (https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e0b.htm#TopOfPage) До досліджуваного періоду входять терміни вегетації основних польових культур вирощування в межах басейну річки Случ.

Із урахуванням кліматичних характеристик регіону та умов певного року вирощування сільськогосподарських культур, визначено коефіцієнти урожайності культур (*Kc*) відповідно до їх водоспоживання у певні фенологічні фази розвитку (табл. 6). Запропоновані коефіцієнти використано для розрахунків значень евапотранспірації культури (ET_c) та просторово-часового моделювання об'ємів водного сліду, визначення частки споживання зеленої води відповідно до кліматичних характеристик певного року та типової структури сівозміни в межах агроландшафтів басейну річки Случ.

Визначено, що середній об'єм водного сліду в період вегетацій 2018–2021 рр. на території агроландшафтів водозбірної території (рисунок 7) для пшениці озимої варіював в межах 3336–3525 м^3/га, жита озимого – 3322–3528 м^3/га, ярових ячменю та пшениці – 2360–2475 м^3/га, кукурудзи на зерно – 3968–4634 м^3/га, соняшника – 2496–2787 м^3/га, ріпаку озимого – 3435–3650 м^3/га. Зафіксовано зональні особливості просторового розподілу об'єму використання води, які характеризуються його збільшенням у верхній частині басейну річки у зв'язку із підвищеними евапотранспіраційними процесами на 5,0–17,0%. Такі процеси викликають зменшення об'єму акумуляції зеленої води для підтримки гідрофункціонування водотоків верхнього ланки річки Случ.

В таблиці 7 представлено розрахунки динаміки водного сліду вирощування основних польових культур в періоди вегетації 2018–2021 рр. Визначено співвідношення використання зеленої води на транспірацію і

Таблиця 5. **Характеристики термінів вегетації основних польових культур у кліматичних умовах басейну річки Случ**

Культура		Термін вегетації			Термін основних фенологічні фази розвитку рослин, діб				
		Вологий рік	Середньовологий рік	Посушливий рік	Характеристика року	L_{ini}	L_{dev}	L_{mid}	L_{late}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пшениця озима	Термін **висіву** (дата, місяць)	15–20.09	15–20.09	20–25.09	Вологий	95	80	20	20
	Термін **збору** (дата, місяць)	20–25.07	15–20.07	10–15.07	Середньовологий	90	75	18	15
	Термін **вегетації** (діб)	215	198	180	Посушливий	85	70	10	15
Жито озиме	Термін **висіву** (дата, місяць)	25.08–01.09	20.08–05.09	01–10.09	Вологий	110	80	15	20
	Термін **збору** (дата, місяць)	20–25.07	20–25.07	10–20.07	Середньовологий	100	75	15	15
	Термін **вегетації** (діб)	225	205	185	Посушливий	90	70	10	15
Пшениця яра	Термін **висіву** (дата, місяць)	01–05.04	25.03–01.04	20–25.03	Вологий	35	30	25	15
	Термін **збору** (дата, місяць)	25–28.07	25–30.07	15–25.07	Середньовологий	30	30	20	15
	Термін **вегетації** (діб)	105	95	85	Посушливий	30	25	20	10
Ячмінь ярий	Термін **висіву** (дата, місяць)	01–05.04	25.03–01.04	20–25.03	Вологий	35	30	25	15
	Термін **збору** (дата, місяць)	25–28.07	25–30.07	15–25.07	Середньовологий	30	30	20	15
	Термін **вегетації** (діб)	105	95	80	Посушливий	30	20	20	10

Продовження таблиці 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кукурудза на зерно	Термін **висіву** (дата, місяць)	10–15.05	05–10.05	25.04–02.05	Вологий	45	45	50	30
	Термін **збору** (дата, місяць)	15–20.10	10–15.10	01–10.10	Середньо-логий	50	45	45	25
	Термін **вегетації** (діб)	170	165	155	Посушливий	50	45	40	20
Соняшник	Термін **висіву** (дата, місяць)	10–15.05	05–10.05	25.04–2.05	Вологий	50	35	15	20
	Термін **збору** (дата, місяць)	20–25.09	15–20.09	05–15.09	Середньо-логий	45	30	15	18
	Термін **вегетації** (діб)	120	108	105	Посушливий	45	30	15	15
Ріпак озимий	Термін **висіву** (дата, місяць)	10–15.08	15–20.08	25.08–01.09	Вологий	125	50	30	20
	Термін **збору** (дата, місяць)	15–20.07	05–10.07	01–05.07	Середньо-логий	120	40	25	15
	Термін **вегетації** (діб)	225	200	185	Посушливий	115	35	20	15

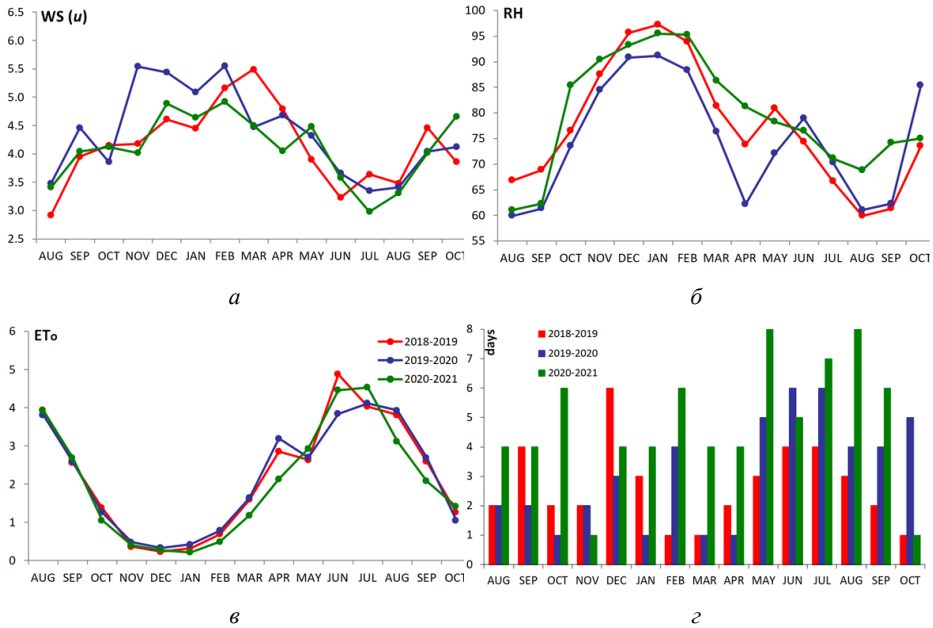


Рис. 6. **Розподіл значень кліматичних характеристик у вегетаційні періоди 2018–2021 рр. для визначення та коригування значення коефіцієнту урожайності культури (*Kc*) відповідно до методики FAO Penman-Monteith ET_0:**

а – швидкість вітру, м/с; б – вологість повітря, %; в – значення еталонної евапотранспірації, мм/добу; г – надходження атмосферних опадів у вигляді дощу та снігу, діб

вирощування основних польових культур (*WUha*, м^3/га; *WUt*, м^3/тонну) та евапорації ґрунтової (синьої) вологи (*Eha*, м^3/га; *Et*, м^3/тонну). Частка розподілу зеленої води варіює в залежності від кліматичних умов, сівозміни, терміну вегетації та урожайності культури. Значення водоспоживання на 1 га (*WUha*, м^3/га) враховує споживання води на розвиток рослини та транспірацію із поверхні рослинності. Зокрема, значення *WUha* залежить від кліматичних умов року, урожайності певної культури (*AY*, тонн/га) та водоспоживання на 1 тонну продукції (*WUt*, м^3/тонну).

Відносно високі значення водного сліду (*WFha*) на 1 га зафіксовано при вирощувані кукурудзи на зерно – від 4159 м^3/га до 4203 м^3/га та озимих культур, в тому числі: пшениці озимої – 3294–3628 м^3/га, жита озимого – 3335–3594 м^3/га, ріпаку озимого – 3325–3770 м^3/га. Зокрема, відносно низькі значення *WFha* мають культури із коротким терміном вегетації, в тому числі: ячмінь ярий – 2230–2530 м^3/га, соняшник – 2500–2850 м^3/га. Важливою характеристикою загального об'єму споживання зеленої води та розрахунок величини евапорації ґрунтової вологи є урожайність (*AY*, тонн/га) та водний слід (*WUt*) в залежності від кліматичних характеристик

Таблиця 6. **Розподіл значень *Кс* в період вегетації основних польових культур у кліматичних умовах басейну річки Случ**

Роки	Культури	Місяці														
		AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Значення коефіцієнту урожайності культури (*Кс*)																
2018–2019	Пшениця озима		0.45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.63	0.84	1.06	1.17	0.25			
	Жито озиме	0.20	0.45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.63	0.84	1.06	1.17	0.25			
	Пшениця яра								0.35	0.67	0.71	1.17	0.25			
	Ячмінь ярий								0.35	0.67	0.71	1.17	0.25			
	Кукурудза на зерно										0.38	0.53	0.80	1.12	1.35	0.35
	Соняшник										0.38	0.53	0.80	1.11	0.35	
	Ріпак озимий	0.20	0.45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.64	0.85	0.97	1.02	0.35			
2019–2020	Пшениця озима		0.30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.63	0.93	1.10	1.21	0.25			
	Жито озиме		0.30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.63	0.93	1.10	1.21	0.25			
	Пшениця яра								0.35	0.78	0.84	1.21	0.25			
	Ячмінь ярий								0.35	0.78	0.84	1.21	0.25			
	Кукурудза на зерно										0.50	0.51	0.76	1.11	1.33	0.35
	Соняшник										0.50	0.51	0.76	1.10	0.35	
	Ріпак озимий	0.20	0.30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.71	0.95	1.00	1.01	0.35			
2020–2021	Пшениця озима		0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.71	1.06	1.21	0.25			
	Жито озиме	0.20	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.71	1.06	1.21	0.25			
	Пшениця яра									0.30	0.82	1.21	0.25			
	Ячмінь ярий									0.30	0.82	1.21	0.25			
	Кукурудза на зерно										0.50	0.53	0.73	1.06	1.25	0.35
	Соняшник										0.50	0.53	0.73	1.06	0.35	
	Ріпак озимий	0.20	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.71	0.97	1.03	0.35			

Продовження таблиці 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Значення значень евапотранспірації культури (ET_c), мм/добу																
2018–2019	Пшениця озима		1.15	0.69	0.18	0.12	0.16	0.35	1.00	2.39	2.79	5.70	1.01			
	Жито озиме	0.79	1.15	0.69	0.18	0.12	0.16	0.35	1.00	2.39	2.79	5.70	1.01			
	Пшениця яра								0.56	1.91	1.87	5.70	1.01			
	Ячмінь ярий								0.56	1.91	1.87	5.70	1.01			
	Кукурудза на зерно										1.00	2.58	3.22	4.27	3.50	0.44
	Соняшник										1.00	2.58	3.22	4.23	0.91	
	Ріпак озимий	0.79	1.15	0.69	0.18	0.12	0.16	0.35	1.02	2.42	2.55	4.97	1.41			
2019–2020	Пшениця озима		0.78	0.63	0.24	0.17	0.21	0.39	1.03	2.97	2.97	4.65	1.03			
	Жито озиме		0.78	0.63	0.24	0.17	0.21	0.39	1.03	2.97	2.97	4.65	1.03			
	Пшениця яра								0.57	2.49	2.27	4.65	1.03			
	Ячмінь ярий								0.57	2.49	2.27	4.65	1.03			
	Кукурудза на зерно										1.35	1.96	3.12	4.36	3.58	0.37
	Соняшник										1.35	1.96	3.12	4.32	0.94	
	Ріпак озимий	0.76	0.78	0.63	0.24	0.17	0.21	0.39	1.16	3.03	2.70	3.88	1.44			
2020–2021	Пшениця озима		1.08	0.53	0.20	0.14	0.11	0.25	0.59	1.51	3.11	5.40	1.13			
	Жито озиме	0.79	1.08	0.53	0.20	0.14	0.11	0.25	0.59	1.51	3.11	5.40	1.13			
	Пшениця яра									0.64	2.40	5.40	1.13			
	Ячмінь ярий									0.64	2.40	5.40	1.13			
	Кукурудза на зерно										1.47	2.36	3.31	3.31	2.60	0.49
	Соняшник										1.47	2.36	3.31	3.31	0.73	
	Ріпак озимий	0.79	1.08	0.53	0.20	0.14	0.11	0.25	0.59	1.51	2.84	4.59	1.59			

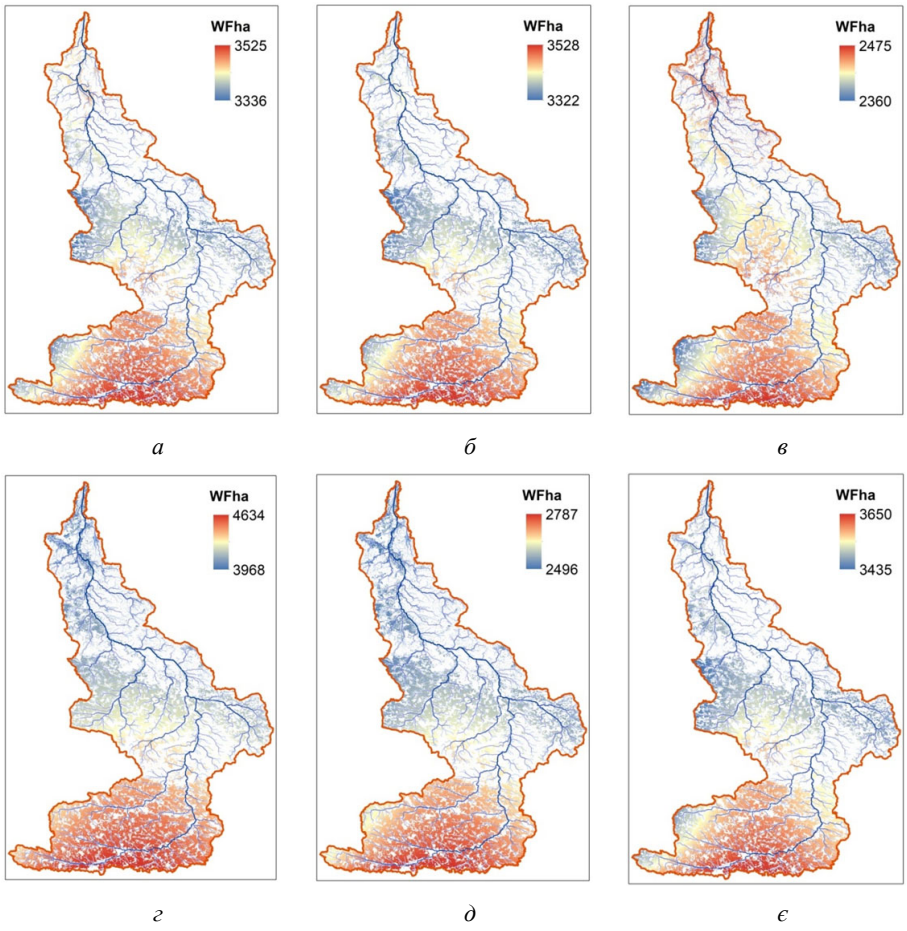


Рис. 7. **Просторова диференціації водного сліду (*WFha*, м³/га) вирощування основних польових культур в періоди вегетації 2018–2021 рр.:**

а – озима пшениця, б – жито озиме; в – ярові ячмінь та пшениця; г – кукурудза на зерно; д – соняшник; є – ріпак озимий

року вегетації агроценозів. Високі значення *WFt* фіксуються у технічних культур, в межах 864–1330 м³/тонну, низькі значення *WFt* мають кукурудза на зерно від 429 м³/тонну до 584 м³/тонну та ячмінь ярий – 572–609 м³/тонну. Тому, насиченість сівозміни технічними культурами обумовлює збільшення об'ємів водного сліду у 1,5–2,3 рази та евапорацію ґрунтової (синьої) вологи у 1,3–4,0 рази. Фіксується значна частка об'єму евапорації ґрунтової (синьої) вологи (*Et/WFt*) під посівами жита озимого та ріпаку озимого – від 0,45 до 0,53. Це характеризує високий рівень споживання зеленої води, низьку продуктивність вирощування культур та відсутність їх агроекологічної доцільності при розробці оптимальних моделей

Таблиця 7. **Середнє значення динаміки водного сліду вирощування основних польових культур в періоди вегетації 2018–2021 рр.**

Культура		Вегетаційний період								
		AY, тонн/га	WFha, м³/га	WUha, м³/га	Eha, м³/га	WFt, м³/тонну	WUt, м³/тонну	Et, м³/тонну	WUt/WFt	Et/WFt
Пшениця озима	2018–2019	4,5	3294	2318	976	732	515	217	0.70	0.30
	2019–2020	5,4	3628	2568	1060	672	476	196	0.71	0.29
	2020–2021	5,7	3354	2280	1074	588	400	188	0.68	0.32
Жито озиме	2018–2019	3,6	3335	1800	1535	926	500	426	0.54	0.46
	2019–2020	3,9	3594	1700	1894	922	436	486	0.47	0.53
	2020–2021	4,4	3347	1825	1522	761	415	346	0.55	0.45
Ячмінь ярий	2019	3,9	2230	1873	357	572	480	92	0.84	0.16
	2020	4,1	2495	1850	645	609	451	157	0.74	0.26
	2021	4,4	2530	1848	682	575	420	155	0.73	0.27
Кукурудза на зерно	2019	7,2	4203	2775	1428	584	385	198	0.66	0.34
	2020	9,1	4526	3185	1341	497	350	147	0.70	0.30
	2021	9,7	4159	2905	1254	429	299	129	0.70	0.30
Соняшник	2019	2,8	2500	1970	530	893	704	189	0.79	0.21
	2020	2,9	2570	1885	685	886	650	236	0.73	0.27
	2021	3,3	2850	1820	1030	864	552	312	0.64	0.36
Ріпак озимий	2018–2019	2,5	3325	1760	1565	1330	704	626	0.53	0.47
	2019–2020	3,0	3534	1950	1584	1178	650	528	0.55	0.45
	2020–2021	3,3	3770	1815	1955	1142	550	592	0.48	0.52

використання ґрунтової (синьої) вологи для регіону досліджень. Представлені розрахунки показують співвідношення витрат зеленої (*WUt/WFt*) та синьої (*Et/WFt*) води для вирощування окремих полових культур в межах басейну річки Случ.

Просторова диференціації водного сліду (*WFha*, м³/га, *WF*, м³/вегетацію) вирощу вання агроценозів у періоди вегетації 2018–2021 рр. та величина акумуляції зеленої води на агроландшафтах розрахована у відповідності до співвідношення насиченості сівозмінами основних польових культур в межах басейну річки Случ, зокрема: пшениця озима – 24,3%, жито озиме – 1,9%, ячмінь ярий – 7,5%, кукурудза на зерно – 31,3%, соняшник – 24,8%, ріпак озимий – 10,2%. Найбільші значення *WFha* (рис. 8) зафіксовано у вегетаційний період від серпня 2019 (посушливого) року до жовтня 2020 (середньоводого) року – від 3385 м³/га до 3739 м³/га. У вегетаційний період від серпеня 2018 (середньоводого) року до жовтня 2019 (посушливого) року значення *WFha* варіювало в межах 3157–3508 м³/га; від серпня 2020 (середньоводого) року до жовтня 2021 (водого) року значення *WFha* змінювалося від 3329 м³/га до 3621 м³/га. Загальний об'єм водного сліду (*WF*, м³/вегетацію) вирощування сівозміни польових культур склало: у 2018–2019рр. – 1991 млн м³, 2019–2020 рр. – 2440 млн м³, 2020–2021 рр. – 2363 млн м³.

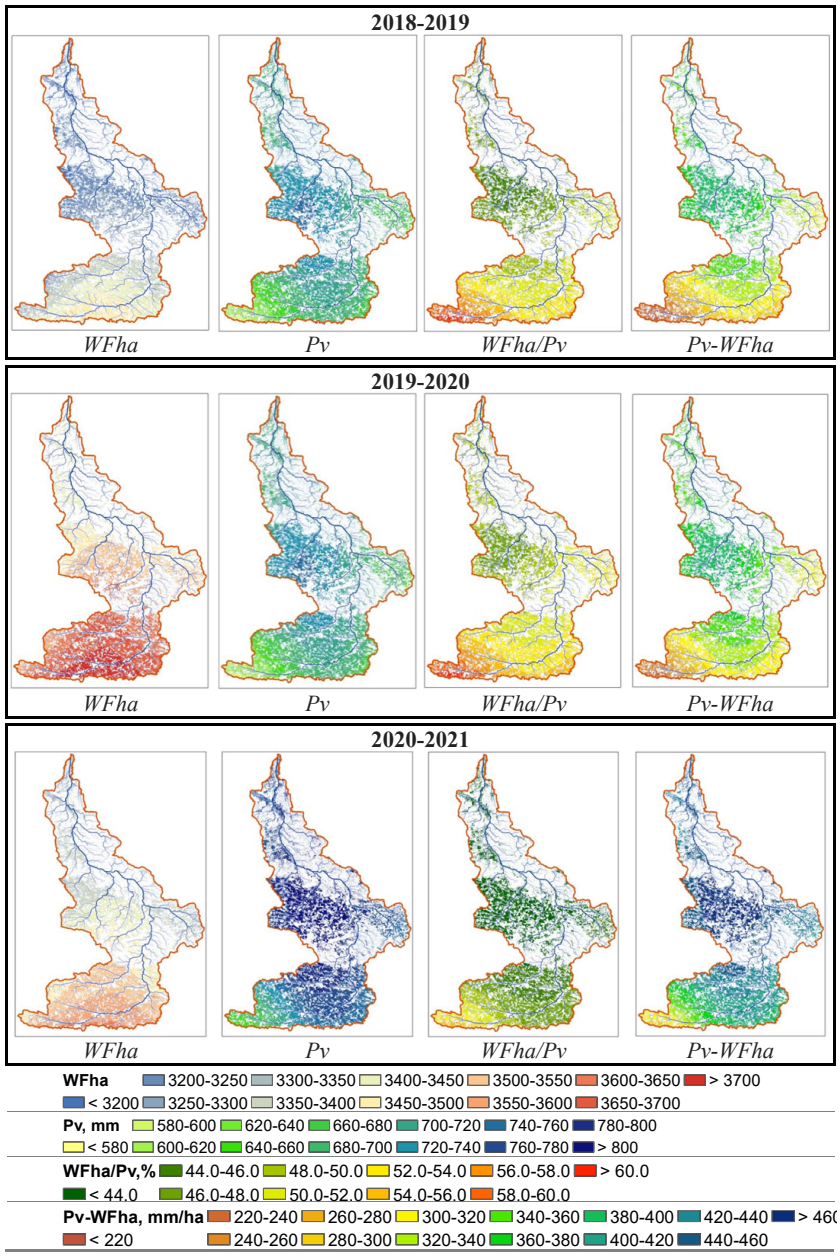


Рис. 8. **Баланс споживання зеленої води основними польовими культурами в періоди вегетації 2018–2021 рр.:**

WFha – водний слід вирощування польових культур, м^3/га; *Pv* – сума надходження атмосферних опадів за вегетаційний період, мм; *WFha/Pv* – співвідношення споживання дощової (зеленої) води у вегетаційний період, %; *Pv-WFha* – акумуляція зеленої води на агроландшафтах водозбірної території, мм/га

Надходження атмосферних опадів (*Pv*, mm) за вегетаційний період 2018–2019 рр. в межах агроландшафтів водозбірної території річки варіювало в межах 556–716 мм; у 2019–2020 рр. – від 595 мм до 744 мм; у 2020–2021 рр. – від 646–817 мм. Загальний об'єм надходження атмосферних опадів за вегетаційний період в межах агроландшафтів водозбірної території річки становив: у 2018–2019 рр. – 3760 млн м^3, 2019–2020 рр. – 4423 млн м^3, 2020–2021 рр. – 4839 млн м^3.

На основі співвідношення даних *WFha* і *Pv* визначено просторово-часові закономірності зміни часки споживання атмосферних опадів сівозміною польових культур у роки вегетацій з різними кліматичними умовами. Зокрема, у вегетаційний період 2018–2019 рр. (середньоволог ий → посушливий) частка споживання атмосферних опадів (*WFha/Pv*,%*)* склала 45,2–61,5 %; у 2019–2020 рр. (посушливий → середньоволог ий) – від 47,4 % до 61,6 %; у 2020–2021 рр. (середньоволог ий → волог ий) – від 41,4 % до 55,2 %. Одержані результати надають можливості здійснити розрахунки об'єму акумуляції дощової (зеленої) води (*Pv-WFha*, мм) на агроландшафтах для підтримки гідрофункціонування водозбірної території річки Случ. Встановлено, що у вегетаційний період 2018–2019 рр. акумуляція зеленої води після вирощування основних польових культур склала 215–392 мм/га; у 2019–2020 рр. – 229–389 мм/га; у 2020–2021 рр. – 289–477 мм/га. Загальний об'єм акумуляція зеленої води за вегетаційний період з агроландшафтів для забезпечення водно-балансової стійкості басейну річки склало: у 2018–2019 рр. – 1769 млн м^3 або 47,0 % від надходження атмосферних опадів *Pv;* 2019–2020 рр. – 1983 млн м^3 або 44,8 % від *Pv*; 2020–2021 рр. – 2476 млн м^3 або 51,2 % від *Pv*.

Результати проведеного дослідження мають високу сільськогосподарську та екологічну цінність, оскільки дозволяють здійснити коригування та обґрунтування ресурсозберігаючих агротехнологій і сівозмін залежно від кліматичних змін та дефіциту вологи, об'ємів продуктивного водоспоживання окремою культурою, можливості акумуляції дощової (зеленої) води та збереження ґрунтової (синьої) вологи для формування подальших сприятливих умов вегетації польової сівозміни. У екологічному сенсі результати є важливими для розрахунку об'ємів збереження та додаткової акумуляції вологи, визначення водно-балансової стійкості басейну річки.

Висновки. На основі аналізу даних NASA POWER, FAO та дешифрування космічних знімків супутникового апарату Sentinel 2 встановлено просторово-часові закономірності диференціації водного сліду вирощування сільськогосподарських культур та формування водно-балансової стійкості басейну річки Случ в зоні Полісся України за умовах кліматичних змін. Розроблено серію кліматичних карт та балансу споживання зеле-

ної води основними польовими культурами в періоди вегетації, що надало можливості провести дослідження кліматичних змін, формування обсягів водного сліду в залежності від сівозміни та кліматичних умов періоду вегетації, встановити співвідношення споживання дощової (зеленої) води та ґрунтової (синьої) вологи у вегетаційний період, розрахувати об'єми акумуляція зеленої води на агроландшафтах водозбірної території для встановлення водно-балансової стійкості басейну річки Случ. За результатами кореляційного аналізу встановлено, що головним кліматичним компонентом диференціації еталонної евапотранспірації (ET_o) є температура повітря (T). Рівень кореляції середньорічних значень T і ET_o складає 0,79, середньомісячних 0,95. Об'єми водного сліду розраховано для вегетаційного періоду вирощування сівозміни основних польових озимих і ярих культур за 2018–2021 рр., зокрема: 2018–2019 рр. – середньовологий переходить у посушливий рік; 2019–2020 рр. – посушливий переходить у середньовологий рік; 2020–2021 рр. – середньовологий переходить у вологий рік. Співвідношення насиченості сівозмін за роки досліджень становило: пшениця озима – 24,3 %, жито озиме – 1,9 %, ячмінь ярий – 7,5 %, кукурудза на зерно – 31,3 %, соняшник – 24,8 %, ріпак озимий – 10,2 %. Для культур сівозміни розраховано об'єми використання віртуальної води та співвідношення використання зеленої (дощової) і ґрунтової (синьої) води. Висока насиченість сівозміни технічними культурами обумовлює збільшення об'ємів водного сліду на вирощування 1 тони продукції у 1,5–2,3 рази та евапорацію ґрунтової (синьої) вологи у 1,3–4,0 рази. Тому, висока насиченість сівозміни цими культурами обумовлює низький рівень їх агроекологічної доцільності щодо збереження зеленої води та оптимізації використання ґрунтової (синьої) вологи з метою забезпечення сприятливих умов водно-балансової стійкості басейну річки. Співвідношення використання «зеленої : синьої» води для основних польових культур на агроландшафтах водозбірної території складає: пшениця озима – 0,7 : 0,3; жито озиме – 0,52 : 0,48; ріпак озимий – 0,52 : 0,48; ячмінь ярий – 0,77 : 0,23; кукурудза на зерно – 0,69 : 0,31; соняшник – 0,72 : 0,28. Встановлено, що часка споживання атмосферних опадів сівозміною польових культур у роки вегетацій з різними кліматичними умовами варіювала у 2018–2019 рр. (середньовологий → посушливий) від 45,2 % до 61,5 %; у 2019–2020 рр. (посушливий → середньовологий) – від 47,4 % до 61,6 %; у 2020–2021 рр. (середньовологий → вологий) – від 41,4 % до 55,2 %. Це обумовило неоднорідність додаткової акумуляції зеленої води у агроландшафтах на забезпечення водно-балансової стійкості басейну річки на рівні: у 2018–2019 рр. – 1769 млн м^3 або 47,0 % від надходження атмосферних опадів (*Pv*); 2019–2020 рр. – 1983 млн м^3 або 44,8 % від *Pv*; 2020–2021 рр. – 2476 млн м^3 або 51,2 % від *Pv*. Запропонована схема досліджень та одер-

жані результати є важливими для коригування та обґрунтування ресурсозберігаючих агротехнологій та сівозмін у відповідності до кліматичних змін, визначення водно-балансової стійкості басейну річки через показник додаткової акумуляції зеленої води.

SPATIAL-TEMPORAL DIFFERENTIATION OF THE WATER FOOTPRINT OF AGRICULTURAL CROP GROWING IN THE SLUCH RIVER CATCHMENT AREA UNDE R THE CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE

Pichura V.I. *– Doctor of Agriculture, Professor,*
Potravka L.O. *– Doctor of Economics, Professor,*
Kherson State Agrarian and Economic University,
pichuravitalii@gmail.com, potravkalarisa@gmail.com

Water footprint is a common and efficient indicator in evaluating water resources. Quantitative evaluation of green water footprint is important for evaluating water resources at the basin level under conditions of climate change and moisture deficit. Agriculture is a main sector of exploitation of natural resources that has a considerable impact on water balance stability of river basins since it is water-consuming, and the portion of water footprint use reaches 86%. Therefore, under conditions of climate change and unstable moisture supply, it is necessary to enhance the system of evaluation aimed at efficient use of water resources in the system of basin exploitation of natural resources, environmental protection and improvement of life maintenance quality. The purpose of the research was to calculate water footprint in growing the basic field crops and establish the volumes of additional water accumulation to provide the hydro-functioning of the Sluch river basin in the territory of Ukraine under conditions of climate change. The research was based on the data of climate change analysis in 1981–2022, decoding of the actual satellite imagery of the spacecraft Landsat 2 and statistical data on crop rotation structure in the agrolandscapes of the water catchment area in the research region. The scheme of the research of the water catchment area of the Sluch river and calculation of water footprint in growing agricultural crops involve six logical blocks of research organization: identifying water courses and determining the boundaries of the water catchment area, establishing the land structure of the river basin, examining climate change, calculating the balance of water use and spatio-temporal differentiation of water footprint in growing the basic field crops on the basis of the FAO Penman-Monteith method and calculating water balance stability of the Sluch river basin. The volumes of water footprint were calculated for the vegetation periods of the basic field winter and spring crops in 2018–2021: 2018–2019 – a semi-wet year grows into a dry year; 2019–2020 – a dry year grows into a semi-wet year; 2020–2021 – a semi-wet year grows into a wet year. Spatio-temporal regularities of the formation of water footprint and the ratio of green and blue water use in growing different agricultural crops were determined. The total volume of water footprint in growing the field crops of a certain crop rotation equaled: in 2018–2019 – 1991 mln m^3, 2019–2020 – 2440 mln m^3, 2020–2021 – 2363 mln m^3. The total volume of precipitation in the vegetation period

within the river water catchment area was: in 2018–2019 – 3760 mln мм^3, 2019–2020 – 4423 mln m^3, 2020–2021– 4839 mln m^3. The total volume of additional accumulation of green (rain) water in the vegetation period in the agro-landscapes of the river basin equaled: in 2018–2019 – 1769 mln m^3, or 47.0 % of precipitation in the vegetation period (Pv); 2019–2020 – 1983 mln m^3, or 44.8 % of Pv; 2020–2021 – 2476 mln m^3, or 51.2 % of Pv. The proposed research scheme and the obtained results are important for adjusting and substantiating water- and resource-saving agrotechnologies and crop rotations depending on climate change, for determining water balance stability of the river basin in accordance with the indicators of additional accumulation of green water.

Key words: climate, water footprint, agriculture, field crops, water consumption, river basin, modelling, the Sluch river.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pichura V., Potravka L., Vdovenko N., Biloshkurenko O., Stratichuk N., Baysha K. Changes in Climate and Bioclimatic Potential in the Steppe Zone of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23(12). P. 189–202. https://doi.org/10.12911/22998993/154844
2. Asgarizadeh Z., Gifford R., Colborne L. Predicting climate change anxiety. *Journal of Environmental Psychology*. 2023. Vol. 90. 102087. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2023.102087
3. Mei H., Li Y.P., Suo C., Ma Y., Lv J. Analyzing the impact of climate change on energy-economy-carbon nexus system in China. *Applied Energy*. 2020. Vol. 262. 1144568. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114568
4. Prajapati R.N., Ibrahim N., Thapa B.R. Climate change impact on water availability in the Himalaya: Insights from Sunkoshi River basin, Nepal. *HydroResearch.* 2023. https://doi.org/10.1016/j.hydres.2023.10.002
5. Pichura V. I., Potravka L. A., Skrypchuk P. M., Stratichuk N. V. Anthropogenic and climatic causality of changes in the hydrological regime of the Dnieper river. *Journal of Ecological Engineering.* 2020. Vol. 21(4). P. 1–10. https://doi.org/10.12911/22998993/119521
6. Yingshuo Lyu Y., Chen H., Cheng Z., He Y., Zheng X. Identifying the impacts of land use landscape pattern and climate changes on streamflow from past to future. *Journal of Environmental Management.* 2023. Vol. 345. 118910. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118910
7. Chowdhury A., Hasan K., Hasan R., Younos T. B. Climate change impacts and adaptations on health of Internally Displaced People (IDP): An exploratory study on coastal areas of Bangladesh. *Heliyon.* 2020. Vol. 6(9). e05018. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05018
8. Coleman M. A., Wernberg T. A Glass Half Full: Solutions-Oriented Management under Climate Change. *Trends in Ecology & Evolution.* 2021. Vol. 36(5). P. 385–386. https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.02.009
9. Pichura V. I., Domaratsky Y. A., Yaremko Yu. I., Volochnyuk Y. G., Rybak V. V. Strategic Ecological Assessment of the State of the Transbound-

ary Catchment Basin of the Dnieper River Under Extensive Agricultural Load. *Indian Journal of Ecology*. 2017. Vol. 44(3). P. 442–450.
10. Han Z., Wei Y., Meng J., Zou Y., Wu Q. Integrated water security and coupling of social-ecological system to improve river basin sustainability. *Science of the Total Environment.* 2023. Vol. 905. 167182. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167182
11. Pei Y., Qiu H., Yang D., Liu Z., Ma S., Li J., Cao M., Wufuer W. Increasing landslide activity in the Taxkorgan River Basin (eastern Pamirs Plateau, China) driven by climate change. *CATENA*. 2023. Vol. 223. 106911. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106911
12. Pichura V. I., Malchykova D. S., Ukrainskij P. A., Shakhman I. A., Bystriantseva A. N. Anthropogenic Transformation of Hydrological Regime of The Dnieper River. *Indian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 45(3). P. 445–453.
13. Rivaes R. P., Feio M. J., Almeida S.F.P., Calapez A. R., Sales M., Gebler D., Lozanovska I., Aguiar F. C. River ecosystem endangerment from climate change-driven regulated flow regimes. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 818. 151857. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151857
14. Пічура В. І. Басейнова організація природокористування на водозбірній території транскордонної річки Дніпро. Херсон: «ОЛДІ-ПЛЮС», 2020. 380 с.
15. Montes R., Méndez S., Cobas J., Carro N., Neuparth T., Alves N., Santos M. M., Quintana J. B., Rodil R. Occurrence of persistent and mobile chemicals and other contaminants of emerging concern in Spanish and Portuguese wastewater treatment plants, transnational river basins and coastal water. *Science of the Total Environment.* 2023. Vol. 885. 163737. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163737
16. Li M., Lu S., Li W. Stakeholders′ ecological-economic compensation of river basin: A multi-stage dynamic game analysis. *Resources Policy*. 2022. Vol. 79. 103083. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103083
17. Lavet N.V.S., Banerjee A., Kartha S. A., Dutta S. Impact of anthropogenic activities on river-aquifer exchange flux in an irrigation dominated Ganga river sub-basin. *Journal of Hydro*logy. 2021. Vol. 602. 126811. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126811
18. Pichura V., Potravka L., Skok S., Vdovenko N. Causal Regularities of Effect of Urban Systems on Condition of Hydro Ecosystem of Dnieper River. *Indian Journal of Ecology.* 2020. Vol. 47(2). P. 273–280.
19. Xiong L., Ning J., Wang J., Dong Y. Coupling degree evaluation of heavy metal ecological capacity and enterprise digital transformation in river basins. *Ecological Indicators.* 2021. Vol. 133. 108358. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108358

20. Madeira C. L., Acayaba R. D., Santos V. S., Villa J.E.L., Jacinto-Hernández C., Azevedo J.A.T., Elias V. O., Montagner C. C. Uncovering the impact of agricultural activities and urbanization on rivers from the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí basin in São Paulo, Brazil: A survey of pesticides, hormones, pharmaceuticals, industrial chemicals, and PFAS. *Chemosphere.* 2023. Vol. 341. 139954. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139954
21. Prasood S. P., Mukesh M. V., Rani V. R., Sajinkumar K. S., Thrivikramji K. P. Urbanization and its effects on water resources: Scenario of a tropical river basin in South India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment.* 2021. Vol. 23. 100556. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100556
22. Dudiak N. V., Pichura V. I., Potravka L. A., Stratichuk N. V. Geomodelling of Destruction of Soils of Ukrainian Steppe Due to Water Erosion. *Journal of Ecological Engineering.* 2019. Vol. 20 (8). P. 192–198.
23. Santos F. M., Pelinson N. S., Oliveira R. P., Lollo J.A.D. Using the SWAT model to identify erosion prone areas and to estimate soil loss and sediment transport in Mogi Guaçu River basin in Sao Paulo State, Brazil. *CATENA*. 2023. Vol. 222. 106872. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106872
24. Hoekstra A. Y., Chapagain A. K. Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources. Blackwell Publishing: Oxford, 2008. 224.
25. Dudiak N. V., Potravka L. A., Stroganov A. A. Soil and climatic bonitation of agricultural lands of the steppe zone of Ukraine. *Indian Journal of Ecology*. 2019. Vol. 46(3). P. 534–540.
26. Wu X., Feng X., Wang Z., Chen Y., Deng Z. Multi-source precipitation products assessment on drought monitoring across global major river basins. *Atmospheric Research*. 2023. Vol. 295. 106982. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106982
27. Furtak K., Wolińska A. The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture – A review. *CATENA*. 2023. Vol. 231. 107378. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107378
28. Pichura V., Domaratskiy Ye., Potravka L., Biloshkurenko O., Dobrovol'skiy A. Application of the Research on Spatio-Temporal Differentiation of a Vegetation Index in Evaluating Sunflower Hybrid Plasticity and Growth-Regulators in the Steppe Zone of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24(6). P. 144–165. https://doi.org/10.12911/22998993/162782
29. Pichura V., Potravka L., Domaratskiy Ye., Petrovas S. Spatiotemporal patterns and vegetation forecasting of sunflower hybrids in soil and climatic conditions of the Ukrainian Steppe zone. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science.* 2023. Vol. 27(3). P. 31–45. 10.56407/bs.agrarian/3.2023.31.

30. Domaratskiy E. O., Zhuykov O. G., Ivaniv M. O. Influence of Sowing Periods and Seeding Rates on Yield of Grain Sorghum Hybrids under Regional Climatic Transformations. *Indian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 45(4). P. 785–789.
31. Domaratskiy E. O., Bazaliy V. V., Domaratskiy O. O., Dobrovol'skiy A. V., Kyrychenko N. V., Kozlova O. P. Influence of Mineral Nutrition and Combined Growth Regulating Chemical on Nutrient Status of Sunflower. *Indian Journal of Ecology.* 2018. Vol. 45(1). P. 126–129.
32. Domaratskiy Ye., Berdnikova O., Bazaliy V., Shcherbakov V., Gamayunova V., Larchenko O., Domaratskiy A., Boychuk I. Dependence of winter wheat yielding capacity on mineral nutrition in irrigation conditions of southern Steppe of Ukraine. *Indian Journal of Ecology*. 2019. Vol. 46(3). P. 594–598.
33. Skok S., Breus D., Almashova V. Assessment of the Effect of Biological Growth-Regulating Preparations on the Yield of Agricultural Crops under the Conditions of Steppe Zone. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24(7). P. 135–144.
34. Gao J., Zhuo L., Duan X., Wu P. Agricultural water-saving potentials with water footprint benchmarking under different tillage practices for crop production in an irrigation district. *Agricultural Water Management*. 2023. Vol. 282. 108274. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108274
35. Wu N., Yin J., Engel B. A., Hua E., Li X., Zhang F., Wang Y. Assessing the sustainability of freshwater consumption based on developing 3D water footprint: A case of China. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 364. 132577. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132577
36. Pellicer-Martínez F., Martínez-Paz J.M. The Water Footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level. *Science of the Total Environment.* 2016. Vol. 571. P. 561–574. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.022
37. Muratoglu A. Water footprint assessment within a catchment: A case study for Upper Tigris River Basin. *Ecological Indicators.* 2019. Vol. 106. 105467. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105467
38. Strahler A. N. Hypsomttric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc.Amer. Bull.* 1952.
39. Приймаченко І. В. Екологічний моніторинг басейну річки Случ. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Агрономія.* 2013. Вип. 183(2). С. 241–248.
40. Бєдункова О. О. Оцінка сучасного екологічного стану поверхневих вод річки Случ за басейновим принципом. *Вісник національного університету та природокористування.* 2013. Вип. 4(64). С. 74–82.
41. Бєдункова О. О., Статник І. І., Боярин М. В. Вибір індикаторів моніторингу якості поверхневих вод річки Случ. Водні біоресурси та аквакультура. 2023. Вип. 1(13). С. 109–123. https://doi.org/10.32851/wba.2023.1.9

REFERENCES

1. Pichura V., Potravka L., Vdovenko N., Biloshkurenko O., Stratichuk N., Baysha K. (2022). Changes in Climate and Bioclimatic Potential in the Steppe Zone of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering,* Vol. 23 (12), 189–202. https://doi.org/10.12911/22998993/154844.
2. Asgarizadeh Z., Gifford R., Colborne L. (2023). Predicting climate change anxiety. *Journal of Environmental Psychology*, Vol. 90, 102087. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2023.102087.
3. Mei H., Li Y.P., Suo C., Ma Y., Lv J. (2020). Analyzing the impact of climate change on energy-economy-carbon nexus system in China. *Applied Energy,* Vol. 262, 1144568. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114568.
4. Prajapati R. N., Ibrahim N., Thapa B. R. (2023). Climate change impact on water availability in the Himalaya: Insights from Sunkoshi River basin, Nepal. *HydroResearch.* https://doi.org/10.1016/j.hydres.2023.10.002.
5. Pichura V. I., Potravka L. A., Skrypchuk P. M., Stratichuk N. V. (2020). Anthropogenic and climatic causality of changes in the hydrological regime of the Dnieper river. *Journal of Ecological Engineering,* Vol. 21(4), 1–10. https://doi.org/10.12911/22998993/119521.
6. Yingshuo Lyu Y., Chen H., Cheng Z., He Y., Zheng X. (2023). Identifying the impacts of land use landscape pattern and climate changes on streamflow from past to future. *Journal of Environmental Management,* Vol. 345, 118910. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118910.
7. Chowdhury A., Hasan K., Hasan R., Younos T.B. (2020). Climate change impacts and adaptations on health of Internally Displaced People (IDP): An exploratory study on coastal areas of Bangladesh. *Heliyon,* Vol. 6(9), e05018. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05018.
8. Coleman M. A., Wernberg T. (2021). A Glass Half Full: Solutions-Oriented Management under Climate Change. *Trends in Ecology & Evolution,* Vol. 36(5), 385–386. https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.02.009.
9. Pichura V. I., Domaratsky Y. A., Yaremko Yu. I., Volochnyuk Y. G., Rybak V. V. (2017). Strategic Ecological Assessment of the State of the Transboundary Catchment Basin of the Dnieper River Under Extensive Agricultural Load. *Indian Journal of Ecology,* Vol. 44(3), 442–450.
10. Han Z., Wei Y., Meng J., Zou Y., Wu Q. (2023). Integrated water security and coupling of social-ecological system to improve river basin sustainability. *Science of the Total Environment,* Vol. 905, 167182. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167182.
11. Pei Y., Qiu H., Yang D., Liu Z., Ma S., Li J., Cao M., Wufuer W. (2023). Increasing landslide activity in the Taxkorgan River Basin (eastern Pamirs

Plateau, China) driven by climate change. *CATENA*, Vol. 223, 106911. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106911.
12. Pichura V. I., Malchykova D. S., Ukrainskij P. A., Shakhman I.A., Bystriantseva A.N. (2018). Anthropogenic Transformation of Hydrological Regime of The Dnieper River. *Indian Journal of Ecology,* Vol. 45(3), 445–453.
13. Rivaes R. P., Feio M. J., Almeida S.F.P., Calapez A. R., Sales M., Gebler D., Lozanovska I., Aguiar F. C. (2022). River ecosystem endangerment from climate change-driven regulated flow regimes. *Science of the Total Environment,* Vol. 818, 151857. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151857 [in English].
14. Pichura V. I. (2020). *Basejnova organizacija pryrodokorystuvannja na vodozbirnij terytorii' transkordonnoi' richky Dnipro* [Basin organization of nature management in the catchment area of the transboundary Dnipro River]. Kherson: «OLDI-PLUS». [in Ukrainian].
15. Montes R., Méndez S., Cobas J., Carro N., Neuparth T., Alves N., Santos M.M., Quintana J.B., Rodil R. (2023). Occurrence of persistent and mobile chemicals and other contaminants of emerging concern in Spanish and Portuguese wastewater treatment plants, transnational river basins and coastal water. *Science of the Total Environment,* Vol. 885, 163737. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163737 [in English].
16. Li M., Lu S., Li W. (2022). Stakeholders′ ecological-economic compensation of river basin: A multi-stage dynamic game analysis. *Resources Policy,* Vol. 79, 103083. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103083.
17. Lavet N.V.S., Banerjee A., Kartha S. A., Dutta S. (2021). Impact of anthropogenic activities on river-aquifer exchange flux in an irrigation dominated Ganga river sub-basin. *Journal of Hydrology*, Vol. 602, 126811. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126811 [in English].
18. Pichura V., Potravka L., Skok S., Vdovenko N. (2020). Causal Regularities of Effect of Urban Systems on Condition of Hydro Ecosystem of Dnieper River. *Indian Journal of Ecology,* Vol. 47(2), 273–280.
19. Xiong L., Ning J., Wang J., Dong Y. (2021). Coupling degree evaluation of heavy metal ecological capacity and enterprise digital transformation in river basins. *Ecological Indicators,* Vol. 133, 108358. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108358.
20. Madeira C. L., Acayaba R. D., Santos V. S., Villa J.E.L., Jacinto-Hernández C., Azevedo J.A.T., Elias V. O., Montagner C. C. (2023). Uncovering the impact of agricultural activities and urbanization on rivers from the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí basin in São Paulo, Brazil: A survey of pesticides, hormones, pharmaceuticals, industrial chemicals, and PFAS. *Chemosphere,* Vol. 341, 139954. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139954 [in English].

21. Prasood S. P., Mukesh M. V., Rani V. R., Sajinkumar K. S., Thrivikramji K. P. (2021). Urbanization and its effects on water resources: Scenario of a tropical river basin in South India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment,* Vol. 23, 100556. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100556.
22. Dudiak N. V., Pichura V. I., Potravka L. A., Stratichuk N. V. (2019). Geomodelling of Destruction of Soils of Ukrainian Steppe Due to Water Erosion. *Journal of Ecological Engineering,* Vol. 20(8), 192–198.
23. Santos F. M., Pelinson N. S., Oliveira R. P., Lollo J.A.D. (2023). Using the SWAT model to identify erosion prone areas and to estimate soil loss and sediment transport in Mogi Guaçu River basin in Sao Paulo State, Brazil. *CATENA*, Vol. 222, 106872. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106872.
24. Hoekstra A. Y., Chapagain A. K. (2008). Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources. Blackwell Publishing: Oxford, 224.
25. Dudiak N. V., Potravka L. A., Stroganov A. A. (2019). Soil and climatic bonitation of agricultural lands of the steppe zone of Ukraine. *Indian Journal of Ecology,* Vol. 46(3), 534–540.
26. Wu X., Feng X., Wang Z., Chen Y., Deng Z. (2023). Multi-source precipitation products assessment on drought monitoring across global major river basins. *Atmospheric Research,* Vol. 295, 106982. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106982.
27. Furtak K., Wolińska A. (2023). The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture – A review. *CATENA,* Vol. 231, 107378. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107378.
28. Pichura V., Domaratskiy Ye., Potravka L., Biloshkurenko O., Dobrovol'skiy A. (2023). Application of the Research on Spatio-Temporal Differentiation of a Vegetation Index in Evaluating Sunflower Hybrid Plasticity and Growth-Regulators in the Steppe Zone of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering,* Vol. 24(6), 144–165. https://doi.org/10.12911/22998993/162782.
29. Pichura V., Potravka L., Domaratskiy Ye., Petrovas S. (2023). Spatiotemporal patterns and vegetation forecasting of sunflower hybrids in soil and climatic conditions of the Ukrainian Steppe zone. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science,* Vol. 27(3), 31–45. 10.56407/bs.agrarian/3.2023.31.
30. Domaratskiy E. O., Zhuykov O. G., Ivaniv M. O. (2018). Influence of Sowing Periods and Seeding Rates on Yield of Grain Sorghum Hybrids under Regional Climatic Transformations. *Indian Journal of Ecology*, Vol. 45(4), 785–789.
31. Domaratskiy E. O., Bazaliy V. V., Domaratskiy O. O., Dobrovol'skiy A. V., Kyrychenko N. V., Kozlova O. P. (2018). Influence of Mineral Nutrition and Combined Growth Regulating Chemical on Nutrient Status of Sunflower. *Indian Journal of Ecology,* Vol. 45(1), 126–129.

32. Domaratskiy Ye., Berdnikova O., Bazaliy V., Shcherbakov V., Gamayunova V., Larchenko O., Domaratskiy A., Boychuk I. (2019). Dependence of winter wheat yielding capacity on mineral nutrition in irrigation conditions of southern Steppe of Ukraine. *Indian Journal of Ecology,* Vol. 46(3), 594–598.
33. Skok S., Breus D., Almashova V. (2023). Assessment of the Effect of Biological Growth-Regulating Preparations on the Yield of Agricultural Crops under the Conditions of Steppe Zone. *Journal of Ecological Engineering,* Vol. 24(7), 135–144.
34. Gao J., Zhuo L., Duan X., Wu P. (2023). Agricultural water-saving potentials with water footprint benchmarking under different tillage practices for crop production in an irrigation district. *Agricultural Water Management,* Vol. 282, 108274. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108274.
35. Wu N., Yin J., Engel B.A., Hua E., Li X., Zhang F., Wang Y. (2022). Assessing the sustainability of freshwater consumption based on developing 3D water footprint: A case of China. *Journal of Cleaner Production,* Vol. 364, 132577. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132577.
36. Pellicer-Martínez F., Martínez-Paz J.M. (2016). The Water Footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level. *Science of the Total Environment,* Vol. 571, 561–574. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.022.
37. Muratoglu A. (2019). Water footprint assessment within a catchment: A case study for Upper Tigris River Basin. *Ecological Indicators,* Vol. 106, 105467. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105467.
38. Strahler A. N. (1952). Hypsomttric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc.Amer. Bull.*
39. Priymachenko I. V. (2013). *Ekologichnyj monitoryng basejnu richky Sluch* [Environmental monitoring of the Sluch river basin]. *Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Agronomy,* Vol. 183(2), 241–248. [in Ukrainian].
40. Biedunkova O. O. (2013). *Ocinka suchasnogo ekologichnogo stanu poverhnevyh vod richky Sluch za basejnovym pryncypom* [Ecological assessment of modern state of river Sluch surface water is basin principle]. *Bulletin of the National University and Nature Management,* Vol. 4(64), 74–82. [in Ukrainian].
41. Biedunkova O. O., Statnyk I. I., Boiaryn M. V. (2023). *Vybir indykatoriv monitoryngu jakosti poverhnevyh vod richky Sluch* [Selection of indicators of surface water quality monitoring of Sluch river]. *Water Bioresources and Aquaculture,* Vol. 1 (13), 109–123. DOI https://doi.org/10.32851/wba.2023.1.9 [in Ukrainian].