УДК 556.5:502.51:711.4(477.41)
DOI https://doi.org/10.32782/NSER/2025-4.30

СТАЛИЙ РОЗВИТОК ВОДНИХ РЕСУРСІВ МАЛИХ РІЧОК УРБАНІЗОВАНИХ ЛАНДШАФТІВ ЖИТОМИРСЬКОГО АДМІНІСТРАТИВНОГО РАЙОНУ

Скиба Галина Віталіївна
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри наук про Землю
Державного університету «Житомирська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-4981-4975
Scopus author ID: 57188747584

Циганенко-Дзюбенко Ілля Юрійович
доктор філософії у галузі екології,
в.о. завідувача кафедри наук про Землю
Державного університету «Житомирська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-3240-8719
Scopus author ID: 59134642100

Курило Святослав Михайлович
кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри наук про Землю
Державного університету «Житомирська політехніка»
ORCID ID: 0009-0008-6138-8850

Шихненко Катерина Олександрівна
здобувачка вищої освіти
Державного університету «Житомирська політехніка»
nz3_shko@student.ztu.edu.ua

Дослідження присвячено розробці комплексного підходу до сталого розвитку водних ресурсів малих річок в умовах урбанізованих ландшафтів Житомирського району. Проведено багаторічний аналіз водно-балансових характеристик п'яти малих річок (Шийка, Лісна, Коднянка, Кам'янка Лісна, Свинолужка) за період 1991–2020 років з використанням гідрометеорологічних даних та інноваційних методів математичного моделювання. Встановлено значну просторову диференціацію гідрологічних параметрів досліджуваних басейнів: річна сума опадів варіює від 690 до 702 мм, евапотранспірація змінюється в діапазоні від 423 до 488 мм, коефіцієнт стоку коливається від 0,08 до 0,17, що відображає дворазову різницю в інтенсивності водообміну між басейнами. Розраховано індекси водного стресу (WSI), які виявили критичні відмінності між басейнами: від помірного рівня водного стресу (WSI = 0,388–0,499 для річок Шийка, Лісна та Кам'янка Лісна) до високого рівня (WSI = 0,548–0,568 для річок Коднянка та Свинолужка). Компонентний аналіз структури стоку дозволив виділити три основні типи гідрологічного режиму залежно від співвідношення поверхневого та ґрунтового стоку, що обумовлено специфікою ландшафтно-екологічної структури басейнів та ступенем урбанізації. Прогнозування за допомогою розробленої гібридної нейро-фізичної моделі показало критичне зростання водного стресу у період 2033–2035 років з досягненням катастрофічних значень WSI на рівні 0,75–0,78. Водно-екологічний індекс демонструє негативну тенденцію погіршення до 2035 року для більшості досліджуваних басейнів з найкритичнішою ситуацією для річок Коднянка та Лісна. Розроблено інноваційну п'ятиетапну концептуальну модель циклічного екологічного планування водних ресурсів, що включає послідовні етапи оцінки водного балансу, розробки екологічних стратегій, впровадження гідрологічних заходів, моніторингу ефективності та адаптивного вдосконалення. Результати дослідження мають важливе практичне значення для водогосподарського планування урбанізованих територій в умо-

© Скиба Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Курило С. М., Шихненко К. О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

вах прогресуючих кліматичних змін та зростання антропогенного навантаження на водні ресурси малих річок.

Ключові слова: *малі річки, водний стрес, урбанізовані ландшафти, сталий розвиток, екологічне планування.*

Skyba G. V., Tsyhanenko-Dziubenko I. Yu., Kurilo S. M., Shykhnenko K. O. Sustainable development of water resources of small rivers in urbanized landscapes of Zhytomyr administrative district

The study is devoted to developing a comprehensive approach to sustainable development of small rivers' water resources in urbanized landscapes of Zhytomyr district. A long-term analysis of water balance characteristics of five small rivers (Shyika, Lisna, Kodnianka, Kam'ianka Lisna, Svynoluzhka) for the period 1991–2020 was conducted using hydrometeorological data and innovative mathematical modeling methods. Significant spatial differentiation of hydrological parameters of the studied basins was established: annual precipitation varies from 690 to 702 mm, evapotranspiration changes in the range from 423 to 488 mm, runoff coefficient fluctuates from 0.08 to 0.17, reflecting a two-fold difference in water exchange intensity between basins. Water stress indices (WSI) were calculated, revealing critical differences between basins: from moderate water stress level (WSI = 0.388–0.499 for Shyika, Lisna and Kam'ianka Lisna rivers) to high level (WSI = 0.548–0.568 for Kodnianka and Svynoluzhka rivers). Component analysis of runoff structure allowed identifying three main types of hydrological regime depending on the ratio of surface and groundwater runoff, determined by the specificity of landscape-ecological structure of basins and degree of urbanization. Forecasting using the developed hybrid neuro-physical model showed critical increase of water stress in 2033–2035 period with reaching catastrophic WSI values at the level of 0.75–0.78. Water-ecological index demonstrates negative deterioration trend by 2035 for most studied basins with the most critical situation for Kodnianka and Lisna rivers. An innovative five-stage conceptual model of cyclical ecological planning of water resources was developed, including sequential stages of water balance assessment, ecological strategies development, implementation of hydrological measures, efficiency monitoring and adaptive improvement. Research results have important practical significance for water management planning of urbanized territories under conditions of progressive climate change and increasing anthropogenic pressure on small rivers' water resources.

Key words: *small rivers, water stress, urbanized landscapes, sustainable development, ecological planning.*

Постановка проблеми та її актуальність. Урбанізація є одним із найбільш динамічних процесів сучасності, що кардинально змінює природну структуру ландшафтів та гідрологічний режим малих водотоків. Малі річки урбанізованих територій зазнають комплексного антропогенного впливу, включаючи забудову водозбірних басейнів, зміну проникності підстилаючої поверхні, спрямлення русел та забруднення стічними водами. В умовах кліматичних змін ці процеси ускладнюються зростанням екстремальності гідрометеорологічних явищ, що створює додаткові виклики для сталого управління водними ресурсами. Житомирський район, як урбанізована територія Полісся України, демонструє характерні проблеми взаємодії природних та антропогенних факторів формування водних ресурсів малих річок.

Мета дослідження полягає у розробці науково обґрунтованого підходу до сталого розвитку водних ресурсів малих річок урбанізованих ландшафтів на основі комплексного аналізу гідрологічних характеристик та прогнозування водного стресу. Завдання дослідження: аналіз водно-балансових характеристик малих річок Житомирського району; оцінка рівнів водного стресу та його просторової диференціації; компонентний аналіз факторів формування водного дефіциту; прогнозування динаміки водно-екологічних показників до 2035 року; розробка концептуальної моделі екологічного планування водних ресурсів. Наукова новизна полягає у розробці гібридної нейрофізичної моделі прогнозування водного стресу та комплексному підході до оцінки водозабезпеченості урбанізованих басейнів із застосуванням індексу водного стресу та водно-екологічного індексу. Практичне значення визначається можливістю використання результатів для водогосподарського планування урбанізованих територій в умовах кліматичних змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сталий розвиток водних ресурсів малих річок урбанізованих ландшафтів є одним із найбільш актуальних завдань сучасного екологічного менеджменту та міського планування. Урбанізація суттєво змінює природну гідроморфологію водотоків, впливаючи на водні угрупування та їх екологічну якість. Попри зростаючі зусилля щодо реабілітації міських струмків, багато проєктів не досягають поліпшення водних угрупувань через недостатнє врахування комплексності екосистемних процесів [21]. Малі міські водотоки відіграють важливу роль у зменшенні забруднення, пом'якшенні паводкових ризиків та покращенні естетичної привабливості міського середовища [1]. Дослідження показують, що звичайно застосовувані заходи підвищення гетерогенності місць існування, такі як додавання меандрів, валунів та

штучних перекатів, недостатні для поліпшення угрупувань безхребетних [21]. Ключовою концепцією для досягнення сталості водних систем є інтегрований підхід до управління міськими водними ресурсами, який передбачає координоване планування всіх водних сервісів з метою досягнення більш ефективного використання ресурсів [3, 20].

Відновлення міських річок, інтегроване зі сталим управлінням міськими водними ресурсами, демонструє значний потенціал для створення стійких міст. Математичне моделювання показує, що поєднання відновлення річок із заходами сталого міського дренажу забезпечує не лише вирішення проблем затоплення, але й значні екологічні та міські вигоди порівняно з традиційними підходами [16]. Ефективність відновлення струмків як природо-орієнтованого підходу до управління нітрогеном залежить від можливості зменшення швидкоплинності та забезпечення доступності органічного карбону для денітрифікації [17]. Цей підхід особливо важливий в контексті інноваційних підходів до сталого використання природних ресурсів України [4]. Просторово-часова динаміка гідроекологічних параметрів річкових екосистем може бути ефективно прогнозована за допомогою інтегрально модифікованої моделі Стрітера-Фелпса [15], що особливо актуально для управління малими міськими водотоками в поствійськових умовах [13, 14].

Участь спільноти громадян є критично важливою для успішного відновлення міських струмків, оскільки забезпечує відповідність цілей проєктів потребам місцевого населення. Проєкти, які не включають значущу участь членів громади, часто не досягають своїх цілей через невідповідність між завданнями проєкту та потребами спільноти [19]. Комплексний підхід до відновлення водотоків повинен включати заходи з управління дощовими водами на рівні водозбору, створення системи планування та оцінки ролі ренатуралізації міських водотоків у формуванні стійкості водозбірних басейнів до паводкових явищ [1]. Дослідження ефективності відновлення середовищ існування показують, що відновлені ділянки демонструють вищу щільність та біомасу риб, хоча аналіз структури водних унрупувань не виявляє сильних зв'язків між статусом річки чи відновлення [16]. Аналітичне оцінювання розподілу полі-елементних важких металів у компонентах урбанізованої гідроекосистеми демонструє необхідність врахування просторової диференціації та ареалів міграції при плануванні заходів відновлення водотоків [10, 11, 12].

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз водно-балансових характеристик малих річок Житомирського району за період 1991–2020 років дозволив встановити основні гідрологічні параметри досліджуваних водотоків та їх варіабельність в умовах урбанізованих ландшафтів. Багаторічні спостереження за гідрометеорологічними показниками є основою для розуміння закономірностей формування водних ресурсів та їх реакції на антропогенні впливи в межах урбанізованих територій (табл. 1).

Аналіз багаторічних даних виявив значну просторову диференціацію гідрологічних характеристик між досліджуваними річками, що обумовлено комплексом ландшафтно-екологічних та антропогенних факторів. Найвищі показники річної суми опадів зафіксовані для басейну річки Шийка (702 мм), що на 1,1% перевищує показники Кам'янка Лісна (695 мм) та на 1,7% – показники річок Свинолужка і Коднянка (690 мм кожна). Річка Лісна займає проміжне положення з показником 694 мм опадів у рік. Така відносно незначна варіація опадів (12 мм або 1,7%) свідчить про відносно однорідні кліматичні умови досліджуваної території, що дозволяє виокремити інші фактори як головні детермінанти гідрологічної варіабельності.

Евапотранспірація демонструє більш виражену просторову диференціацію, варіюючи від 423 мм (Шийка) до 488 мм (Коднянка), що становить різницю 65 мм або 15,4%. Найнижчі показники евапотранспірації у басейні Шийка (423 мм) можуть бути пов'язані з особливостями ландшафтної структури, включаючи вищий відсоток

Таблиця 1

Водно-балансові характеристики малих річок Житомирського району

Річка (Суббасейн)	Опади, мм	Евапотранспірація, мм	Поверхневий стік, мм	Ґрунтовий стік, мм	Коефіцієнт стоку
Шийка (1114)	702	423	61	61	0,17
Лісна (1127)	694	453	49	48	0,14
Коднянка (957)	690	488	31	34	0,09
Кам'янка Лісна (1152)	695	463	38	43	0,12
Свинолужка (1132)	690	462	21	36	0,08

Складено авторами за даними [9].

урбанізованих територій з меншою транспіраційною активністю рослинного покриву. Проміжні показники евапотранспірації демонструють річки Свинолужка (462 мм), Кам'янка Лісна (463 мм) та Лісна (453 мм). Максимальні значення евапотранспірації у басейні Коднянка (488 мм) можуть свідчити про більший відсоток природних ландшафтів з активною транспіраційною діяльністю рослинності.

Компоненти стоку виявляють найбільшу варіабельність серед аналізованих параметрів. Поверхневий стік варіює від 21 мм (Свинолужка) до 61 мм (Шийка), що становить різницю 190,5%. Ґрунтовий стік коливається від 34 мм (Коднянка) до 61 мм (Шийка), різниця становить 79,4%. Коефіцієнт стоку демонструює варіацію від 0,08 (Свинолужка) до 0,17 (Шийка), що відображає дворазову різницю в інтенсивності водообміну між басейнами.

Детальний аналіз співвідношення компонентів стоку дозволяє виявити особливості гідрологічного режиму кожного басейну та механізми формування водних ресурсів в умовах урбанізованих ландшафтів (рис. 1).

Аналіз структури стоку виявляє три основні типи гідрологічного режиму басейнів. Перший тип представлений басейном річки Шийка, де спостерігається практично рівне співвідношення поверхневого (61 мм) та ґрунтового (61 мм) стоку. Такий збалансований розподіл свідчить про оптимальні умови для формування водних ресурсів, де процеси поверхневого стоку ефективно доповнюються ґрунтовим живленням. Це може бути результатом специфічної ландшафтної структури з оптимальним співвідношенням урбанізованих та природних територій.

Другий тип характеризується незначним переважанням поверхневого стоку над ґрунтовим (річки Лісна та Кам'янка Лісна). Для басейну Лісна різниця становить лише 1 мм (49 мм поверхневого проти 48 мм ґрунтового стоку), що вказує на гармонійне співвідношення стокових компонентів. Кам'янка Лісна демонструє дещо більше переважання ґрунтового стоку (43 мм проти 38 мм поверхневого), що може бути пов'язано з особливостями рельєфу та ґрунтових умов басейну.

Третій тип представлений басейнами Коднянка та Свинолужка, де спостерігається переважання ґрунтового стоку над поверхневим. У басейні Коднянка ґрунтовий стік (34 мм) переважає поверхневий (31 мм) на 9,7%, що може бути результатом активних процесів інфільтрації через добре проникну ґрунтову товщу. Найбільший дисбаланс зафіксований у басейні Свинолужка, де ґрунтовий стік (36 мм) перевищує над поверхневим (21 мм) на 71,4%. Така значна диспропорція може свідчити про наявність потужних водоносних горизонтів, високу лісистість басейну або специфічні ґрунтово-геологічні умови, що сприяють активній інфільтрації та акумуляції поверхневих вод.

Просторова варіабельність коефіцієнтів стоку є ключовим індикатором інтенсивності водообміну та ефективності трансформації атмосферних опадів у водні ресурси різних басейнів (рис. 2).

Аналіз коефіцієнтів стоку виявляє чітку ієрархічну структуру водообміну між досліджуваними басейнами. Найвищий коефіцієнт стоку характерний для річки Шийка (0,17), що становить 24,2% від річної суми опадів. Такий відносно високий показник може бути результатом урбанізаційних процесів, які призводять до збільшення площ непроникних поверхонь (асфальтове та бетонне

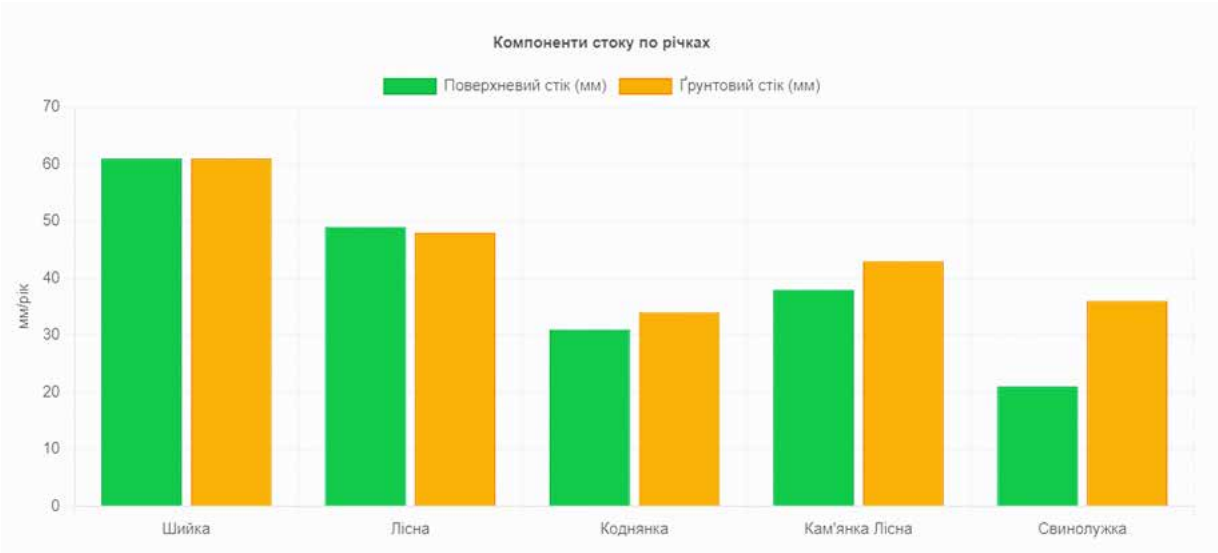

Рис. 1. Компоненти стоку по річках Житомирського району

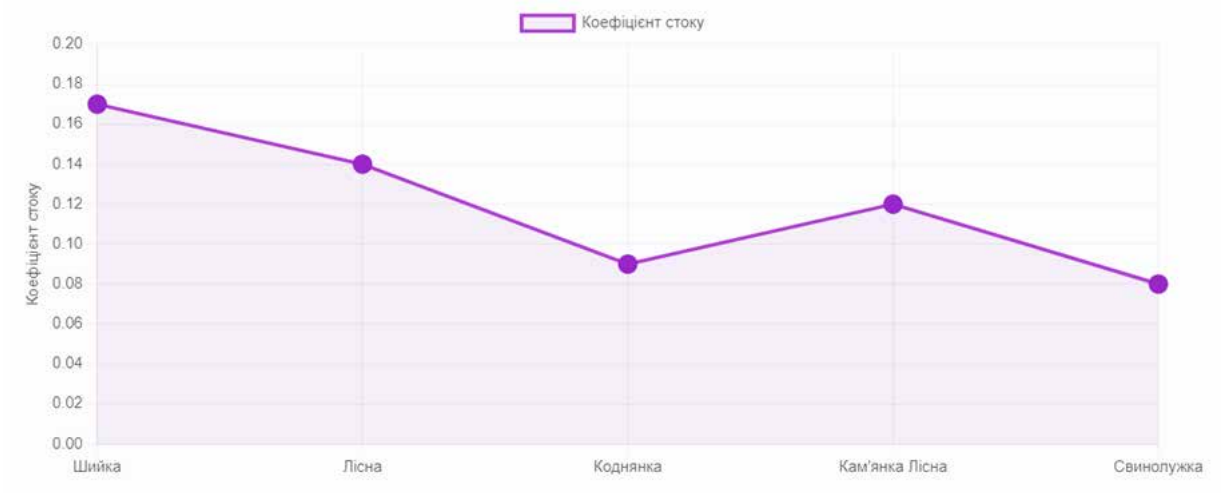

Рис. 2. Коефіцієнти стоку малих річок Житомирського району

покриття, будівлі) та відповідного зростання поверхневого стоку. Урбанізовані території характеризуються підвищеними коефіцієнтами стоку через зменшення інфільтраційної здатності ґрунтів та прискорення процесів відведення поверхневих вод.

Проміжну групу формують річки Лісна (0,14) та Кам'янка Лісна (0,12), коефіцієнти стоку яких становлять 20,2% та 17,3% від річної суми опадів відповідно. Ці показники свідчать про помірний ступінь антропогенної трансформації басейнів зі збереженням значної частки природних ландшафтів, здатних до ефективної регуляції водного режиму.

Найнижчі коефіцієнти стоку зафіксовані для річок Коднянка (0,09) та Свинолужка (0,08), що становить 13,0% та 11,6% від річної суми опадів відповідно. Такі низькі показники можуть бути результатом високої лісистості басейнів, наявності заболочених територій, або специфічних гідрогеологічних умов, що сприяють активній інфільтрації та акумуляції поверхневих вод у ґрунтовій товщі та підземних водоносних горизонтах. Дворазова різниця між максимальними та мінімальними значеннями коефіцієнтів стоку (від 0,08 до 0,17) підкреслює необхідність диференційованих підходів у водогосподарському плануванні та управлінні водними ресурсами різних басейнів Житомирського району.

Для комплексної оцінки водозабезпеченості території було застосовано інтегральні показники, включаючи індекс водного стресу (WSI), який дозволяє кількісно охарактеризувати співвідношення між наявними водними ресурсами та потребами водокористування (табл. 2).

Розрахунки індексу водного стресу виявили критичні відмінності у рівнях водозабезпеченості між досліджуваними річками. Найсприятливіші умови водозабезпечення характерні для басейну річки Шийка (WSI = 0,388), що класифікується згідно з міжнародними стандартами як помірний рівень водного стресу. Коефіцієнт посушливості для цього басейну становить 0,776, що вказує на відносно сприятливі кліматичні умови для формування водних ресурсів.

Проміжну позицію займають басейни річок Лісна (WSI = 0,462, коефіцієнт посушливості = 0,824) та Кам'янка Лісна (WSI = 0,499, коефіцієнт посушливості = 0,851). Ці показники також знаходяться у діапазоні помірного водного стресу, однак наближаються до критичної межі (WSI = 0,5), що вимагає постійного моніторингу та превентивних заходів з оптимізації водокористування.

Найбільш критичну ситуацію демонструють басейни річок Коднянка (WSI = 0,568) та Свинолужка (WSI = 0,548), які класифікуються

Таблиця 2

Розрахункові дані та індекси водного стресу

Річка	Опади (мм)	Евапотранспірація (мм)	Загальний стік (мм)	Коефіцієнт стоку	Коефіцієнт посушливості	WSI	Рівень стресу
Шийка	702	423	122	0,17	0,776	0,388	Помірний
Лісна	694	453	97	0,14	0,824	0,462	Помірний
Коднянка	690	488	65	0,09	0,882	0,568	Високий
Кам'янка Лісна	695	463	81	0,12	0,851	0,499	Помірний
Свинолужка	690	462	57	0.08	0,890	0,548	Високий

як території з високим рівнем водного стресу (WSI > 0,5). Коефіцієнти посушливості для цих басейнів становлять 0,882 та 0,890 відповідно, що свідчить про несприятливі умови водоутворення та високий ризик дефіциту водних ресурсів особливо у період кліматичних екстремумів.

Візуалізація індексу водного стресу дозволяє наочно продемонструвати просторову диференціацію рівнів водозабезпеченості та визначити пріоритетні напрями водогосподарської політики (рис. 3).

Графічне представлення результатів підтверджує виявлені закономірності та демонструє чіткий поділ досліджуваних річок на дві групи за рівнем водного стресу. До першої групи з помірним рівнем водного стресу належать річки Шийка (0,388), Лісна (0,462) та Кам'янка Лісна (0,499). Загальний діапазон варіації WSI у цій групі становить 0,111, що свідчить про відносну однорідність умов водозабезпечення.

Другу групу формують річки Коднянка (0,568) та Свинолужка (0,548) з високим рівнем водного стресу. Різниця між максимальним та мінімальним значеннями WSI у цій групі становить лише 0,020, що вказує на схожість критичних умов водозабезпечення. Загальна амплітуда варіації WSI між усіма досліджуваними басейнами сягає 0,180 (46,4% від мінімального значення), що підкреслює значну просторову неоднорідність водних ресурсів території.

Для поглибленого аналізу факторів, що впливають на формування водного стресу, було проведено компонентний аналіз основних детермінантів гідрологічного режиму (рис. 4).

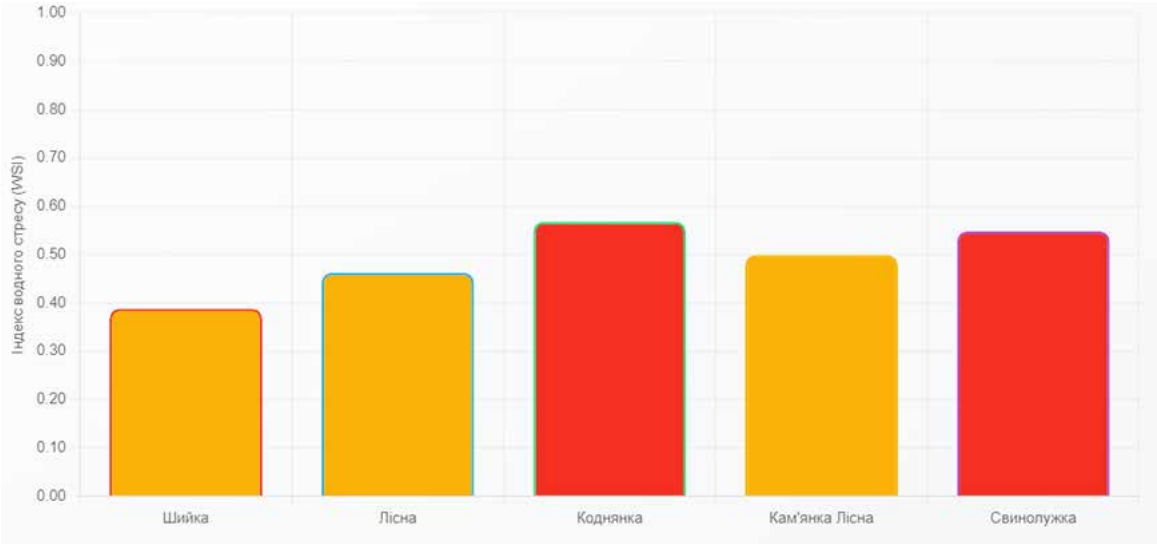

Рис. 3. Індекс водного стресу річок Житомирського району

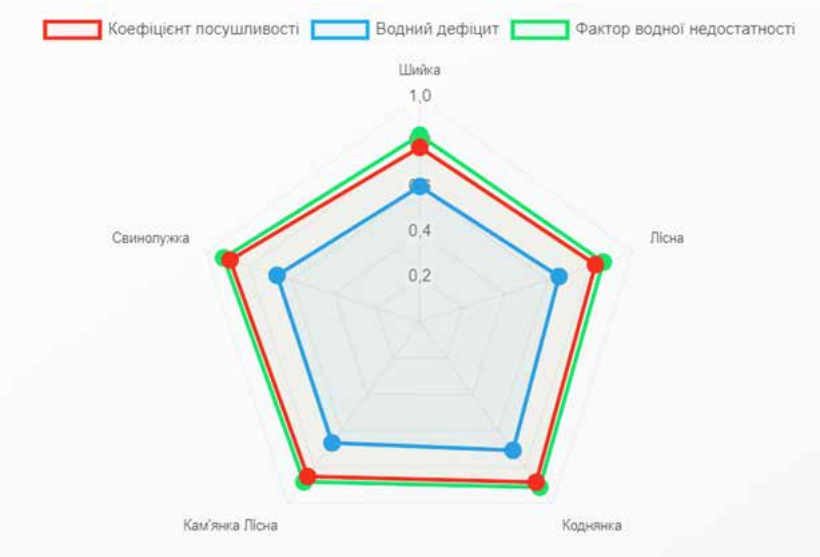

Рис. 4. Компонентний аналіз факторів водного стресу

Радарна діаграма демонструє просторову варіабельність ключових факторів водного стресу за трьома основними компонентами: коефіцієнт посушливості (червона лінія), водний дефіцит (синя лінія) та фактор водної недостатності (зелена лінія). Аналіз дав можливість виявити, що найсприятливіші умови (найменші значення всіх компонентів) характерні для басейну Шийки, де всі три фактори демонструють мінімальні значення у порівнянні з іншими досліджуваними територіями.

Коефіцієнт посушливості виявляє градієнтне зростання від Шийки до Свинолужки, досягаючи максимальних значень у басейнах Свинолужки та Коднянки. Водний дефіцит демонструє аналогічну тенденцію з найнижчими показниками для Шийки та найвищими для Коднянки. Фактор водної недостатності характеризується найбільшою варіабельністю, досягаючи максимальних значень у басейнах Лісної та Коднянки.

Характерною особливістю є відносно низькі показники водного дефіциту для всіх досліджуваних басейнів (значення не перевищують 0,6 на шкалі від 0 до 1), що може свідчити про загалом достатні обсяги поверхневих водних ресурсів за умови їх раціонального використання. Водночас високі значення коефіцієнта посушливості та фактора водної недостатності для басейнів Коднянки та Свинолужки вказують на структурні проблеми водозабезпечення, пов'язані не стільки з абсолютним дефіцитом води, скільки з її нерівномірним територіальним та часовим розподілом.

Прогнозування розвитку водного стресу в умовах кліматичних змін є критично важливим для довгострокового планування водогосподарської діяльності. Гібридна нейро-фізична модель дозволила розробити сценарії розвитку індексу водного стресу до 2035 року (рис. 5).

Прогнозні розрахунки виявили складну динаміку індексу водного стресу з чергуванням періодів відносної стабільності та різких флуктуацій. У період 2025–2030 років прогнозується відносна стабільність показника на рівні 0,55–0,60, що відповідає помірно високому рівню водного стресу.

Критичний період очікується у 2031–2032 роках, коли індекс водного стресу досягне мінімальних значень 0,35–0,37, що може бути пов'язано з циклічними коливаннями кліматичних умов або тимчасовим покращенням водозабезпечення внаслідок реалізації водогосподарських проєктів.

Найбільш тривожною є тенденція різкого зростання водного стресу у період 2033–2035 років, коли прогнозується досягнення критичних значень WSI на рівні 0,75–0,78. Такі показники класифікуються як катастрофічний рівень водного стресу, що вимагає негайного впровадження комплексних заходів з адаптації до кліматичних змін та оптимізації водокористування.

Амплітуда коливань індексу водного стресу у прогнозному періоді становить 0,42 (від 0,35 до 0,77), що перевищує поточну варіабельність між різними басейнами (0,18) більш ніж удвічі. Це свідчить про зростання нестабільності водозабезпечення та необхідність розробки адаптивних стратегій управління водними ресурсами.

Детальний прогноз водно-екологічного індексу (WEI) для кожного з досліджуваних басейнів дозволяє диференціювати стратегії адаптації та визначити пріоритетність втручань (рис. 6).

Прогнозування WEI виявляє диференційовану динаміку для різних басейнів з характерними особливостями для кожної річки. Басейн Шийки

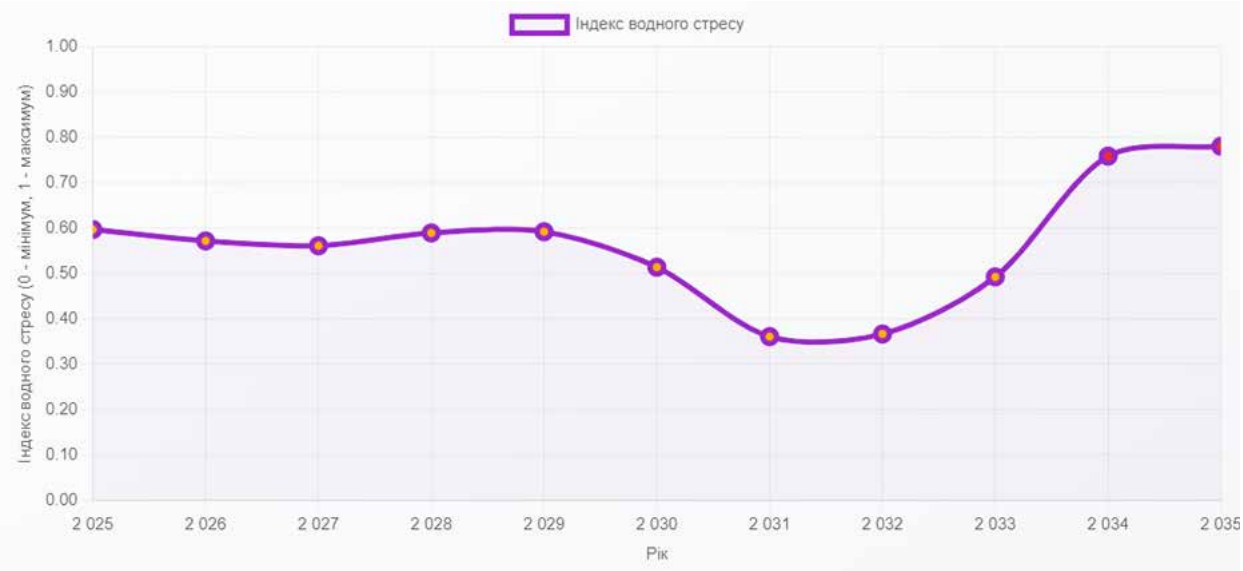

Рис. 5. Прогноз індексу водного стресу (гібридна нейро-фізична модель)

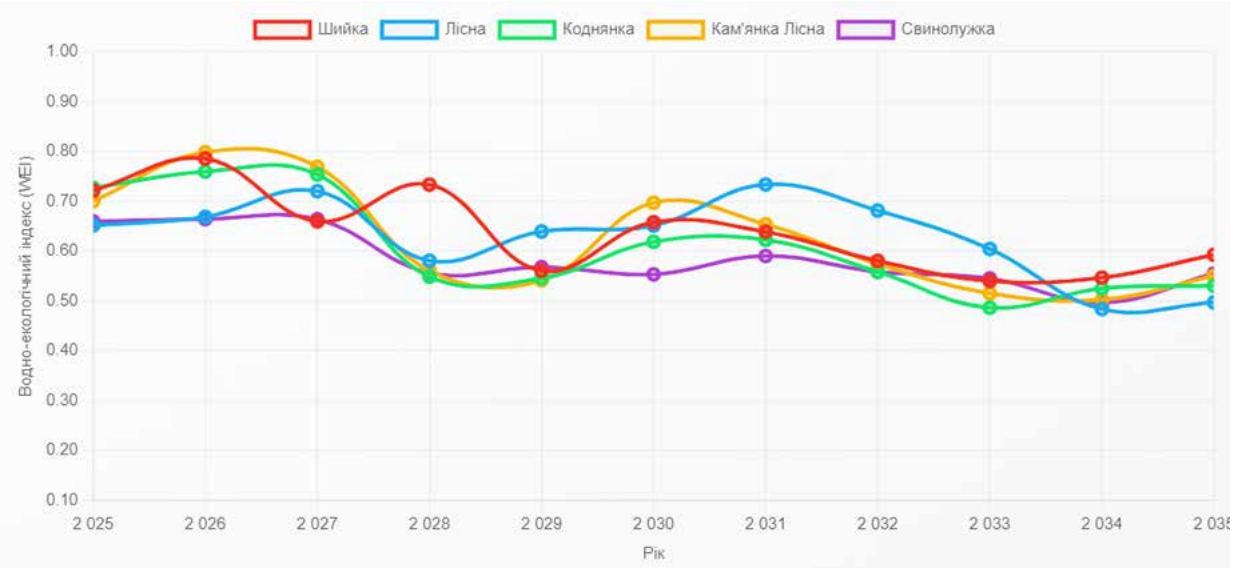

Рис. 6. Прогноз водно-екологічного індексу (WEI) до 2035 року

(червона лінія) демонструє найбільш стабільну динаміку з поступовим зниженням показника від 0,72 у 2025 році до 0,59 у 2035 році. Така тенденція може бути результатом урбанізаційного тиску та зростання антропогенного навантаження на водні ресурси.

Басейн річки Лісної (синя лінія) характеризується більш вираженими коливаннями з максимумом у 2027 році (0,78) та поступовим зниженням до 0,49 у 2035 році. Коднянка (зелена лінія) виявляє схожу тенденцію з піком у 2026 році (0,79) та найнижчими прогнозованими показниками серед усіх басейнів у 2035 році (0,47).

Кам'янка Лісна (помаранчева лінія) демонструє найбільш екстремальні коливання з різким зростанням до 0,80 у 2026 році, подальшим зниженням до 0,53 у 2030 році та стабілізацією на рівні 0,54–0,55 у кінцевому періоді. Свинолужка (фіолетова лінія) характеризується помірними коливаннями з тенденцією до поступового покращення показників від 0,65 у 2025 році до 0,53 у 2035 році.

Загальна тенденція для більшості річкових басейнів полягає у зниженні WEI до 2035 року, що свідчить про прогнозоване погіршення водно-екологічних умов. Найбільш критична ситуація очікується для басейнів Коднянки та Лісної, де прогнозовані показники WEI наближаються до критичної межі 0,47–0,49. Відносно стабільні умови прогнозуються для басейнів Шийки та Свинолужки з показниками WEI на рівні 0,53–0,59.

Методологічну основу запропонованого комплексного підходу до сталого розвитку водних ресурсів становить п'ятиетапний цикл екологічного планування, що забезпечує системність та безперервність процесу управління водними ресурсами урбанізованих ландшафтів (рис. 7).

Запропонована концептуальна модель базується на принципах адаптивного управління та забезпечує циклічність процесу з можливістю безперервного вдосконалення стратегій на основі отриманих результатів моніторингу та оцінки. Перший етап «Оцінка водного балансу» передбачає комплексний аналіз наявності та використання водних ресурсів з урахуванням кліматичних, гідрологічних та антропогенних факторів. Цей етап включає збір та систематизацію даних про опади, евапотранспірацію, поверхневий та ґрунтовий стік, а також оцінку поточного водокористування.

Другий етап «Розробка екологічних стратегій» зосереджується на формуванні науково обґрунтованих підходів до сталого управління водними ресурсами з урахуванням специфіки урбанізованих ландшафтів. Стратегії розробляються на основі результатів попереднього етапу та включають комплекс технічних, економічних та екологічних заходів.

Третій етап «Впровадження стратегій» передбачає практичну реалізацію розроблених планів збереження води та оптимізації її використання. Цей етап включає впровадження водозберігаючих технологій, реконструкцію інфраструктури, створення систем дощової каналізації та інші інженерні рішення.

Четвертий етап «Моніторинг та оцінка» забезпечує систематичне спостереження за ефективністю впроваджених стратегій та їх впливом на стан водних ресурсів. Моніторинг включає як кількісні показники (водний баланс, якість води),

Рис. 7. Цикл екологічного планування водних ресурсів (розроблено авторами)

так і якісні характеристики (екологічний стан водних екосистем).

П'ятий етап «Адаптація та вдосконалення» замикає цикл та забезпечує коригування підходів на основі результатів оцінки ефективності. Цей етап включає аналіз отриманого досвіду, ідентифікацію проблемних аспектів та розробку удосконалених стратегій для наступного циклу планування.

Циклічність моделі забезпечує можливість безперервного вдосконалення системи управління водними ресурсами та її адаптації до мінливих умов навколишнього середовища та соціально-економічного розвитку території.

Висновки. Проведене дослідження дозволило встановити критичну просторову диференціацію водних ресурсів малих річок Житомирського району з поділом на дві групи за рівнем водного стресу: помірного (Шийка, Лісна, Кам'янка Лісна) та високого рівня (Коднянка, Свинолужка). Прогнозування виявило тенденцію критичного погіршення водозабезпеченості до 2033–2035 років з досягненням катастрофічних значень індексу водного стресу 0,75–0,78, що вимагає негайного впровадження адаптивних стратегій управління. Розроблена п'ятиетапна модель екологічного планування забезпечує системний підхід до сталого розвитку водних ресурсів урбанізованих ландшафтів з можливістю безперервного вдосконалення стратегій на основі моніторингу та оцінки ефективності впроваджених заходів.

Література:

1. Doll B. A., Kurki-Fox J. J., Line D. E. A Framework for Planning and Evaluating the Role of Urban Stream Restoration for Improving Transportation Resilience to Extreme Rainfall Events. *Water*. 2020. Vol. 12. No. 6. P. 1620. DOI: https://doi.org/10.3390/w12061620.
2. Feio M. J., Hughes R. M., Callisto M. та ін. The biological assessment and rehabilitation of the world's rivers: An overview. *Water*. 2021. Vol. 13. No. 3. P. 371. DOI: https://doi.org/10.3390/w13030371.
3. Fletcher T. D., Shuster W., Hunt W. F. та ін. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*. 2015. Vol. 12. No. 7. P. 525–542. DOI: https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314.
4. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I. та ін. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7. P. 378–395.
5. Lavelle A. M., Chadwick M. A., Chadwick D. D. A. та ін. Effects of Habitat Restoration on Fish Communities in Urban Streams. *Water*. 2021. Vol. 13. No. 16. P. 2170. DOI: https://doi.org/10.3390/w131602170.
6. Macedo D. R., Callisto M., Linares M. S. та ін. Urban stream rehabilitation in a densely populated Brazilian metropolis. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. P. 921934. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.921934.
7. Palmer M. A., Hondula K. L., Koch B. J. Ecological restoration of streams and rivers: shifting strategies and shifting goals. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2014. Vol. 45. P. 247–269. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091935.
8. Paul M. J., Meyer J. L. Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 2001. Vol. 32. P. 333–365. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040.
9. Osypov V., Bawa A., Osadcha N. та ін. A High-Resolution Hydrological Dataset for Ukrainian River Basins With an Interactive Web Interface. *Geoscience Data Journal*. 2025. Vol. 12. https://doi.org/10.1002/gdj3.70027.
10. Tsyhanenko-Dziubenko I., Šerevičienė V., Ustymenko V. Dissecting biochemical mechanisms that mediate tolerance

to military chemical stressors in diverse malacological systems. *Environmental problems*. 2024. Vol. 9. No. 1. P. 51–58.
11. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Fonseca Araújo J. Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9. No. 3. P. 227–234.
12. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Shomko O. та ін. Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10. No. 2. P. 135–144.
13. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Demchuk L., Vovk V. Hydrochemical Determination of the Teteriv River and the Kamianka River Eutrophication Potential. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2023. Vol. 1. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520089.
14. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Ventsel N. та ін. Remote Evaluation of Post-Military Basin Moshchunka of Kyiv Oblast, Ukraine using Spectral Indices. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2025. Vol. 2. P. 1–5.
15. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Sheliah K. та ін. Mathematical forecasting of spatio-temporal dynamics of hydroecological parameters of river ecosystems using integrally-modified Streeter-Phelps model. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10. No. 3. P. 309–316. DOI: https://doi.org/10.23939/ep2025.03.309.
16. Veról A. P., Battemarco B. P., Merlo M. L. та ін. River restoration integrated with sustainable urban water management for resilient cities. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. No. 11. P. 4677. DOI: https://doi.org/10.3390/su12114677.
17. Wantzen K. M., Alves C. B. M., Badiane S. D. та ін. Urban stream and wetland restoration in the global south – a DPSIR analysis. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. No. 18. P. 4975. DOI: https://doi.org/10.3390/su11184975.
18. Walsh C. J., Roy A. H., Feminella J. W. та ін. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*. 2005. Vol. 24. No. 3. P. 706–723. DOI: https://doi.org/10.1899/04-028.1.
19. Wenger S. J., Bhaskar A. S., Murphy B. та ін. Community-powered urban stream restoration: A vision for sustainable and resilient urban ecosystems. *Freshwater Science*. 2022. Vol. 41. No. 1. P. 151–169. DOI: https://doi.org/10.1086/721150.
20. Wong T. H. Water sensitive urban design-the journey thus far. *Australian Journal of Water Resources*. 2006. Vol. 10. No. 3. P. 213–221. DOI: https://doi.org/10.1080/13241583.2006.11465296.
21. Zerega A., Simões N. E., Feio M. J. How to Improve the Biological Quality of Urban Streams? Reviewing the Effect of Hydromorphological Alterations and Rehabilitation Measures on Benthic Invertebrates. *Water*. 2021. Vol. 13. No. 15. P. 2087. DOI: https://doi.org/10.3390/w131502087.

References:

1. Doll, B.A., Kurki-Fox, J.J., Line, D.E. (2020). A Framework for Planning and Evaluating the Role of Urban Stream Restoration for Improving Transportation Resilience to Extreme Rainfall Events. *Water*, 12, 1620. DOI: https://doi.org/10.3390/w12061620
2. Feio, M.J., Hughes, R.M., Callisto, M., Nichols, S.J., Odume, O.N., Quintella, B.R., Kuemper, M.L., Aguiar, F.C., Almeida, S.F.P., Alonso-EguíaLis, P., Arimoro, F.O., Dyer, F.J., Harding, J.S., Jang, S.W., Johnson, R.K., Kail, J., Kirkwood, A.E., Mackintosh, T.J., Masese, F.O., Mellado-Díaz, A., Ndiritu, G.G., Pompeu, P.S., Prins, R., Pusch, M.T., Samways, M.J., Schmutz, S., Siddig, A.A., Teixeira, A., Yong, J.Y. (2021). The biological assessment and rehabilitation of the world's rivers: An overview. *Water*, 13, 371. DOI: https://doi.org/10.3390/w13030371
3. Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.L., Mikkelsen, P.S., Rivard, G., Uhl, M., Davenport, D., Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12, 525-542. DOI: https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314
4. Kapelista, I., Kireitseva, H., Tsyhanenko-Dziubenko, I., Khomenko, S., Vovk, V. (2024). Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 7, 378–395.
5. Lavelle, A.M., Chadwick, M.A., Chadwick, D.D.A., Pritchard, E.G., Bury, N.R. (2021). Effects of Habitat Restoration on Fish Communities in Urban Streams. *Water*, 13, 2170. DOI: https://doi.org/10.3390/w13162170
6. Macedo, D.R., Callisto, M., Linares, M.S., Hughes, R.M., Romano, B.M.L., Rothe-Neves, M., Silveira, J.S. (2022). Urban stream rehabilitation in a densely populated Brazilian metropolis. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 921934. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.921934
7. Palmer, M.A., Hondula, K.L., Koch, B.J. (2014). Ecological restoration of streams and rivers: shifting strategies and shifting goals. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45, 247-269. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091935
8. Paul, M.J., Meyer, J.L. (2001). Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32, 333–365. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040
9. Osypov, V., Bawa, A., Osadcha, N., Osadchyi, V., Shevchenko, O., Bonchkovskyi, A., Kostetskyi, O., Nikoriak, V., Ahafonov, Y., Matviienko, Y., Mossur, H., O'Donncha, F., Jacobs, M., Srinivasan, R., Arnold, J., White, M.J. (2025). A High-Resolution Hydrological Dataset for Ukrainian River Basins With an Interactive Web Interface. *Geoscience Data Journal.* 12. https://doi.org/10.1002/gdj3.70027

10. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Ševičienė, V., Ustymenko, V. (2024). Dissecting biochemical mechanisms that mediate tolerance to military chemical stressors in diverse malacological systems. *Environmental problems*, 9, 51–58.
11. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Fonseca Araújo, J. (2024). Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*, 9, 227–234.
12. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Shomko, O., Gandziura, V., Khamdosh, I. (2025). Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*, 10, 135–144.
13. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Demchuk, L., Vovk, V. (2023). Hydrochemical Determination of the Teteriv River and the Kamianka River Eutrophication Potential. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1, 1–4. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520089
14. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Ventsel, N., Ventsel, V., Shevchuk, L., Skyba, G. (2025). Remote Evaluation of Post-Military Basin Moshchunka of Kyiv Oblast, Ukraine using Spectral Indices. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment,* 2, 1–5.
15. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Sheliah, K., Levytska, T., Kalenska, V. (2025). Mathematical forecasting of spatio-temporal dynamics of hydroecological parameters of river ecosystems using integrally-modified Streeter-Phelps model. *Journal Environmental Problems*, 10, 309–316. DOI: https://doi.org/10.23939/ep2025.03.309
16. Veról, A.P., Battemarco, B.P., Merlo, M.L., de Sousa, M.M., Miguez, M.G., Rezende, O.M., Gusmaroli, G. (2020). River restoration integrated with sustainable urban water management for resilient cities. *Sustainability*, 12, 4677. DOI: https://doi.org/10.3390/su12114677
17. Wantzen, K.M., Alves, C.B.M., Badiane, S.D., Bala, R., Blettler, M.C.M., Callisto, M., Cao, Y., Kolb, M., Kondolf, G.M., Leite, M.F., Macedo, D.R., Mahdi, O., Neves, M., Peralta, E.M., Rotgé, V., Rueda-Delgado, G., Scharager, A., Serra-Llobet, A., Yengué, J., Zingraff-Hamed, A. (2019). Urban stream and wetland restoration in the global south – a DPSIR analysis. *Sustainability*, 11, 4975. DOI: https://doi.org/10.3390/su11184975
18. Walsh, C.J., Roy, A.H., Feminella, J.W., Cottingham, P.D., Groffman, P.M., Morgan II, R.P. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 24, 706–723. DOI: https://doi.org/10.1899/04-028.1
19. Wenger, S.J., Bhaskar, A.S., Murphy, B., Neale, M., Scoggins, M., Barrett, I., Bledsoe, B., Capps, K.A., Castillo, M.M., Díaz Pascacio, E., Hadwen, W.L., Hawley, R.J., Jackson, R., Margetts, B.I., Middleton, J.A., Nolan, S., Osborne Jelks, N., Rogers, B., Scarlett, R., van Rees, C.B., Horwitz, P. (2022). Community-powered urban stream restoration: A vision for sustainable and resilient urban ecosystems. *Freshwater Science*, 41, 151–169. DOI: https://doi.org/10.1086/721150
20. Wong, T.H. (2006). Water sensitive urban design-the journey thus far. *Australian Journal of Water Resources*, 10, 213-221. DOI: https://doi.org/10.1080/13241583.2006.11465296
21. Zerega, A., Simões, N.E., Feio, M.J. (2021). How to Improve the Biological Quality of Urban Streams? Reviewing the Effect of Hydromorphological Alterations and Rehabilitation Measures on Benthic Invertebrates. *Water*, 13, 2087. DOI: https://doi.org/10.3390/w13152087

Стаття надійшла: 25.08.2025
Прийнято: 10.09.2025
Опубліковано: 27.10.2025