

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-25>

УДК 502.51(282):504.064

КІРЕЙЦЕВА ГАННА

Державний університет «Житомирська політехніка», Україна

<https://orcid.org/0000-0002-1055-1784>

e-mail: gef_kgv@ztu.edu.ua

ЦИГАНЕНКО-ДЗЮБЕНКО ІЛІЯ

Державний університет «Житомирська політехніка», Україна

<https://orcid.org/0000-0002-3240-8719>

e-mail: ke_miyu@ztu.edu.ua

ХОМЕНКО СВІТЛАНА

Державний університет «Житомирська політехніка», Україна

<https://orcid.org/0009-0002-7463-7867>

e-mail: org_hsv@ztu.edu.ua

ПІДВИСОЦЬКИЙ ВІКТОР

Державний університет «Житомирська політехніка», Україна

<https://orcid.org/0000-0002-3350-0920>

e-mail: krrkp_pvt@ztu.edu.ua

НОРМУВАННЯ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ВОДНІ ЕКОСИСТЕМИ: КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ТА УПРАВЛІНСЬКІ РІШЕННЯ

Водні екосистеми сьогодні перебувають під безпрецедентним тиском трансформаційних змін, що характеризуються незворотністю та кумулятивним ефектом. Особливої уваги потребують водно-болотні угіддя як найбільш вразливі компоненти водних екосистем, що виконують критично важливі екологічні функції. Метою дослідження є систематизація наукових досліджень теоретичних підходів до визначення трансформаційних змін водних екосистем та розробка критеріїв їх оцінки для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Проведено комплексний аналіз сучасних теоретичних підходів, систематизацію наукової літератури та бібліометричний аналіз 2835 публікацій у базі даних Scopus за період 1990-2024 років. Результати засвідчили експоненційне зростання публікаційної активності з початку 2000-х років, що відображає зростаючу актуальність проблематики. Запропоновано визначення трансформаційних змін водних екосистем як суттєвих, часто незворотних змін у структурі, функціонуванні та екологічній стабільності водних середовищ, викликаних природними та антропогенними факторами. Розроблено систему критеріїв оцінки трансформації водних екосистем, що включає гідрологічні, фізико-хімічні та біологічні показники з відповідними кількісними індикаторами для нормування антропогенного навантаження. Проаналізовано кумулятивні ефекти основних факторів впливу: урбанізації, кліматичних змін та воєнних дій. Встановлено, що поєднання різних факторів створює синергетичні ефекти, що значно перевищують простий адитивний вплив. Наукова новизна полягає у формуванні цілісної концептуальної рамки для розуміння трансформаційних змін водних екосистем та розробці підходів до їх регулювання. Практична значущість обумовлена можливістю використання результатів для розробки ефективних стратегій управління водними ресурсами в умовах множинних стресових впливів та забезпечення сталого розвитку водогосподарської галузі.

Ключові слова: екологічна стійкість, трансформаційні зміни, кумулятивні ефекти, водно-болотні угіддя, синергетичні впливи.

KIREITSEVA HANNA

PIDVYSOTSKYI VIKTOR

TSYHANENKO-DZIUBENKO ILLIA

KHOMENKO SVITLANA

Zhytomyr Polytechnic State University, Ukraine

STANDARDIZATION OF ANTHROPOGENIC LOAD ON AQUATIC ECOSYSTEMS: ASSESSMENT CRITERIA AND MANAGEMENT DECISIONS

Aquatic ecosystems are currently under unprecedented pressure from transformational changes characterized by irreversibility and cumulative effects. The intensification of anthropogenic load, climate change, and especially in Ukrainian realities, military actions, has significantly complicated the nature of impacts on surface water bodies. Wetlands require special attention as the most vulnerable components of aquatic ecosystems that perform critically important ecological functions including hydrological regime regulation, water purification, biodiversity maintenance, and carbon sequestration. The aim of this study is to systematize scientific research on theoretical approaches to defining transformational changes in aquatic ecosystems and develop criteria for their assessment to make evidence-based management decisions in environmental regulation and anthropogenic load standardization.

A comprehensive analysis of modern theoretical approaches, systematization of scientific literature, and bibliometric analysis of 2835 publications in the Scopus database for the period 1990-2024 were conducted. The results confirmed exponential growth in publication activity since the early 2000s, reflecting the increasing relevance of transformational changes in aquatic ecosystems in global scientific discourse. Subject structure analysis revealed the dominance of ecological sciences (39.6%), significant contributions from social sciences (14.7%), Earth sciences (11.3%), and engineering sciences (9.4%), indicating the interdisciplinary nature of the problem.

Transformational changes in aquatic ecosystems are defined as significant, often irreversible changes in the structure, functioning, and ecological stability of aquatic environments caused by natural and anthropogenic factors, leading to the formation of new stable ecosystem states that significantly differ from the initial ones and are characterized by the loss of ability to return to the previous state even after cessation of disturbing factors. A comprehensive system of criteria for assessing transformation of aquatic ecosystems has been developed, including three main groups: hydrological, physico-chemical, and biological indicators with corresponding quantitative indicators for standardizing anthropogenic load. Quantitative transformation indicators have been established: changes in average annual flow >15%, oxygen concentration <6 mg/l, Shannon index decrease >20%, etc.

The cumulative effects of major impact factors were analyzed: urbanization, climate change, and military actions. It was established that the combination of different factors creates synergistic effects that significantly exceed simple additive impact. Particularly dangerous are combinations of urbanization with climate change (eutrophication enhancement), urbanization with military actions (complex pollution), and climate change with military actions (ecosystem degradation acceleration). The scientific novelty lies in forming a holistic conceptual framework for understanding transformational changes in aquatic ecosystems and developing approaches to their regulation through permit activities and environmental standards implementation. The practical significance is determined by the possibility of using the results to develop effective water resource management strategies under conditions of multiple stress impacts, optimize permit activities in ecology, and ensure sustainable development of the water management sector through evidence-based decision-making processes.

Keywords: ecological resilience, transformational changes, cumulative effects, wetlands, synergistic impacts, management decisions, sustainable development.

Стаття надійшла до редакції / Received 28.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми

Водні екосистеми сьогодні перебувають під безпрецедентним тиском трансформаційних змін, що характеризуються незворотністю та кумулятивним ефектом. За останні десятиліття спостерігається значне ускладнення характеру впливу на поверхневі водні об'єкти через інтенсифікацію антропогенного навантаження, кліматичні зміни та, особливо в українських реаліях, воєнні дії.

Аналіз сучасної наукової літератури свідчить про фрагментарність підходів до визначення трансформаційних змін водних екосистем. Різні дослідницькі школи використовують власні дефініції та критерії, що ускладнює порівняння результатів та розробку уніфікованих підходів до управління водними ресурсами. Особливо гостро ця проблема проявляється в умовах України, де воєнні дії створили новий тип факторів впливу на водні екосистеми, що потребує переосмислення існуючих концептуальних підходів.

Спільний вплив урбанізації, кліматичних змін та військових дій спричиняє формування нових, змінених людиною режимів водного стоку, що охоплюють понад третину досліджуваних річкових басейнів. Воєнні дії особливо негативно впливають на якість води, знижуючи вміст кисню до критичних 2,33% та збільшуючи концентрації важких металів у 2,5–3,7 рази. Орієнтовно 70% контрольованих ділянок не відповідають екологічним нормам, водночас моніторинг охоплює лише частину необхідних показників: 34,5% біологічних, 85,7% фізико-хімічних та 25% гідроморфологічних параметрів.

Особливої уваги потребують водно-болотні угіддя як найбільш вразливі компоненти водних екосистем [1, 2]. Ці унікальні природні комплекси виконують критично важливі екологічні функції – регулювання гідрологічного режиму, очищення води, підтримка біорізноманіття та деponування вуглецю [3, 4]. Водно-болотні угіддя характеризуються найвищою чутливістю до трансформаційних змін через специфічні гідрологічні умови та складну структуру біоценозів [5]. За останні десятиліття площа водно-болотних угідь України скоротилася на 60% [6, 7], що свідчить про критичну необхідність розробки спеціальних підходів до оцінки та збереження цих екосистем у контексті трансформаційних змін [8].

Відсутність єдиної теоретичної бази для визначення та оцінки трансформаційних змін водних екосистем унеможливорює розробку ефективних стратегій управління водними ресурсами. Існуючі підходи часто зосереджуються на окремих аспектах трансформацій, не враховуючи їх системний характер та взаємозв'язки між різними типами впливу. Це особливо актуально в контексті адаптації до вимог Європейського Союзу та розробки інноваційних підходів, що враховують сучасні виклики.

Теоретичні основи управління екологічним станом поверхневих водних об'єктів потребують переосмислення з урахуванням нових реалій. Комплексний характер проблеми вимагає розробки інноваційних підходів, які враховують як традиційні фактори впливу, так і нові виклики, пов'язані з воєнними діями та кліматичними змінами.

Розв'язання зазначених проблем потребує системного аналізу існуючих теоретичних підходів, розробки уніфікованого понятійного апарату та критеріїв оцінки трансформаційних змін водних екосистем, що і становить предмет даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Систематичний аналіз сучасної наукової літератури свідчить про інтенсивний розвиток досліджень трансформаційних змін водних екосистем протягом останніх двох десятиліть. Проведений бібліометричний аналіз 2835 публікацій у базі даних Scopus за період 1990–2024 років виявив експоненційне зростання публікаційної активності з початку 2000-х років, що відображає зростаючу актуальність проблематики [9].

Аналіз предметної структури досліджень показав домінування екологічних наук (39,6%), значний внесок соціальних наук (14,7%), наук про Землю (11,3%) та інженерних наук (9,4%), що свідчить про міждисциплінарний характер проблематики [10]. Географічний розподіл публікацій демонструє лідерство Великої Британії (22 публікації), Китаю (12) та США (11) у дослідженнях впливу кліматичних змін на річкові системи [11].

Сучасні дослідження характеризуються еволюцією від суто технічних підходів до комплексного розуміння трансформаційних процесів. Карпентер та співавт. [12] запропонували концепцію альтернативних стабільних станів озерних екосистем, що стала основою для розуміння

незворотних змін у водних системах. Шеффер та співавт. [13] розвинули теорію критичних переходів у екологічних системах, виділивши індикатори наближення до точок біфуркації. Холлінг [14] у своїх класичних роботах обґрунтував концепцію стійкості екосистем та виділив два типи стійкості – інженерну (повернення до рівноваги) та екологічну (здатність поглинати збурення). Гандерсон і Холлінг [15] розширили цю концепцію, запропонувавши адаптивний цикл як модель трансформацій соціо-екологічних систем.

Використання геоінформаційних технологій та дистанційного зондування набуває все більшого поширення у дослідженнях трансформацій водних екосистем. Пекел та співавт. [16] продемонстрували можливості використання супутникових даних Landsat для моніторингу глобальних змін поверхневих вод за період 1984-2015 років. Тулбур та співавт. [17] розробили методику інтеграції індексів NDWI та NDVI для оцінки динаміки водно-болотних угідь. Розвиток IoT-технологій відкриває нові можливості для автоматизованого моніторингу водних об'єктів. Цзян та співавт. [27] продемонстрували ефективність використання мережі сенсорів для реального часу контролю якості води. Лю та співавт. [28] розробили інтегровану платформу для моніторингу водних ресурсів з використанням штучного інтелекту.

Аллан [18] систематизував антропогенні фактори впливу на річкові екосистеми, виділивши урбанізацію як ключовий драйвер трансформацій. Уолш та співавт. [19] описали "синдром міських потоків", що характеризується зміною гідрологічного режиму, деградацією якості води та спрощенням біологічних угруповань. Особливої уваги заслуговують дослідження впливу кліматичних змін на водні ресурси. Делль і Чжан [20] проаналізували зміни водного стоку у глобальному масштабі та спрогнозували критичні регіони з дефіцитом водних ресурсів. Верешмарті та співавт. [21] оцінили загрози для глобальних водних систем та ідентифікували регіони найвищого ризику.

В українському науковому просторі важливі внески зробили Осадчий В.І. [22], який досліджував гідрохімічні особливості поверхневих вод України, та Гребінь В.В. [23], що аналізував зміни водного режиму річок у зв'язку з кліматичними змінами. Хільчевський В.К. [24] систематизував підходи до оцінки екологічного стану водних об'єктів України відповідно до вимог Водної Рамкової Директиви ЄС. Відносно новим напрямком є вивчення впливу воєнних дій на водні екосистеми. Демчук та співавт. [25] проаналізували екологічні наслідки воєнних дій в Україні, включаючи вплив на водні ресурси. Кірейцева та співавт. [26] дослідили токсичні впливи війни на водні об'єкти України, виявивши специфічні механізми деградації водних екосистем в умовах військових дій.

Попри значний прогрес у розумінні окремих аспектів трансформаційних змін водних екосистем, відсутня єдина концептуальна рамка, що інтегрує різні типи факторів впливу та їх взаємодію. Особливо це стосується кумулятивних ефектів одночасної дії урбанізації, кліматичних змін та воєнних дій, що характерно для сучасних умов України. Недостатньо розробленими залишаються критерії та індикатори для оцінки незворотних трансформаційних змін водних екосистем. Існуючі підходи часто зосереджуються на окремих параметрах (гідрохімічних, біологічних тощо), не враховуючи системний характер трансформацій.

Проведений аналіз свідчить про необхідність розробки інтегрованого підходу до визначення та оцінки трансформаційних змін водних екосистем, що враховує сучасні виклики та специфіку українських умов. Це обґрунтовує актуальність даного дослідження та визначає його наукову новизну.

Метою даного дослідження є систематизація наукових підходів до нормування антропогенного навантаження на водні екосистеми та розробка критеріїв для прийняття управлінських рішень у сфері природокористування.

Виклад основного матеріалу

Проведене дослідження базується на комплексному аналізі сучасних теоретичних підходів до визначення та оцінки трансформаційних змін водних екосистем. Результати систематизації наукової літератури та бібліометричного аналізу дозволили сформулювати цілісне уявлення про еволюцію концептуальних засад у цій галузі та виявити ключові прогалини в існуючих підходах.

Аналіз сучасної наукової літератури виявляє термінологічну неузгодженість у використанні поняття «трансформаційні зміни водних екосистем». Деякі дослідники вважають цей термін тавтологічним, оскільки трансформація сама по собі означає зміну. Проте, детальний аналіз міжнародної наукової практики свідчить про правомірність та необхідність використання саме терміну «трансформаційні зміни» як усталеного наукового поняття з особливим змістовим навантаженням. В англomовній науковій літературі термін «transformational change» широко використовується провідними дослідниками та міжнародними організаціями, включаючи Міжурядову групу з питань зміни клімату (Intergovernmental Panel on Climate Change), яка оперує поняттям «transformational adaptation», та провідні екологічні журнали, що публікують дослідження «transformational ecosystem changes». Розмежування за значенням між поняттями «трансформація» як загального процесу перетворення та «трансформаційні зміни» як конкретних проявів цього процесу з певними характеристиками є функціонально обґрунтованим. Прикметник «трансформаційні» виконує диференціюючу функцію, відрізняючи ці зміни від адаптивних, поступових, зворотних або локальних змін. Аналогічно в науковій термінології використовуються поняття «еволюційні зміни», «революційні зміни», «градаційні зміни», де прикметник характеризує специфіку процесу зміни. Класичні роботи

Голлінга (1973) з «transformational changes in ecosystems» [10], Карпентера та ін. (2001) з «transformational shifts» [2] та Вокера та ін. (2004) з «transformational change» [25] закріпили цю термінологію в екологічній науці, надавши їй міцного теоретичного підґрунтя..

На основі систематизації існуючих підходів та аналізу міжнародної практики під трансформаційними змінами водних екосистем слід розуміти суттєві, часто незворотні зміни у структурі, функціонуванні та екологічній стабільності водних середовищ, викликані природними та антропогенними факторами, що призводять до формування нових стабільних станів екосистем, які суттєво відрізняються від початкових та характеризуються втратою здатності до повернення в попередній стан навіть після припинення дії збуджуючих факторів.

Ключові характеристики трансформаційних змін охоплюють:

✓ Структурні перетворення екосистеми: модифікації в популяціях живих організмів, включаючи зникнення або експансію окремих видів, що порушує рівновагу між трофічними рівнями. Проникнення чужорідних видів здатне кардинально змінити харчові мережі.

✓ Гідрологічні трансформації: варіації водного об'єму, швидкості потоку, температурного режиму або стокових характеристик внаслідок гідротехнічного будівництва, кліматичних коливань чи міської забудови.

✓ Хімічне забруднення та зміна водного складу: індустриальні та агрохімічні контаміанти (пестициди, мінеральні добрива, токсичні метали, полімерні відходи) спричиняють евтрофікацію, дефіцит кисню та загрозу для гідробіонтів.

✓ Деградація біологічної різноманітності: порушення оселищ призводить до локального зникнення видів або їх міграції, що дестабілізує екосистемну стійкість.

✓ Функціональні порушення: зниження самовідновлювальної спроможності водойм, погіршення водної якості, порушення кругообігу біогенних елементів.

Трансформаційні зміни охоплюють широкий спектр модифікацій, що впливають як на фізико-хімічні характеристики водних систем, так і на їх біологічні компоненти. Особливу увагу слід приділити тому, що такі зміни можуть відбуватися як поступово, протягом тривалого періоду, так і раптово, внаслідок катастрофічних подій.

Основні аспекти трансформаційних змін включають зміну структури екосистеми через модифікації в популяціях організмів, таких як вимирання або масове розмноження певних видів, що призводить до порушення балансу між різними трофічними рівнями. Вторгнення інвазивних видів може змінити структуру харчового ланцюга, створюючи каскадні ефекти у всій екосистемі. Зміни гідрологічних параметрів, включаючи об'єм води, швидкість течії, температуру або режим стоку, можуть виникати через будівництво дамб, зміну клімату чи урбанізацію. Забруднення та зміна хімічного складу води через промислові та сільськогосподарські забруднювачі, такі як пестициди, добрива, важкі метали та пластик, можуть викликати евтрофікацію, зниження рівня кисню та загрозу для життя водних організмів.

Втрата або зменшення біорізноманіття внаслідок змін, що порушують середовище існування певних видів, призводить до їх вимирання або переміщення, що знижує стабільність і стійкість екосистеми. Зміна екологічних функцій проявляється у зниженні здатності водойм до самоочищення, погіршенні якості води та зменшенні здатності до регуляції поживних речовин.

Для комплексної оцінки впливу визначених факторів на водні екосистеми було розроблено систему критеріїв оцінки їх трансформації (табл. 1), яка включає три основні групи: гідрологічні, фізико-хімічні та біологічні. Кожна група критеріїв характеризується специфічними показниками та методами їх визначення, що дозволяє всебічно оцінити стан водної екосистеми та виявити ознаки її трансформації.

Таблиця 1

Система критеріїв оцінки трансформації водних екосистем

Група критеріїв	Показники	Методи визначення	Індикатори трансформації
Гідрологічні	витрата води ; рівневий режим ; швидкість течії ;	гідрометричні спостереження; моніторинг рівнів води; вимірювання швидкостей	зміна середньорічного стоку >15%; порушення природного режиму рівнів; зміна швидкісного режиму >25%
Фізико-хімічні	розчинений кисень; рН води; електропровідність; прозорість	гідрохімічний аналіз; автоматичні вимірювання; польові дослідження	O ₂ <6 мг/л; рН за межами 6,5-8,5; зміна прозорості >50%
Біологічні	індекс Шеннона ; індекс сапробності; структура угруповань	гідробіологічні дослідження; розрахунок індексів; популяційний аналіз	зниження індексу Шеннона >20%; зміна сапробності на 1 клас; випадіння видів-індикаторів

Примітка: складено авторами за даними [3, 8, 15, 21].

Розроблена система критеріїв оцінки трансформації водних екосистем ґрунтується на комплексному підході, що охоплює три взаємопов'язані групи показників. Кожна група критеріїв відображає специфічні аспекти функціонування водних екосистем, але разом вони формують цілісну картину екологічного стану водного середовища.

Гідрологічні критерії становлять основу для оцінки фізичних параметрів водного середовища. Витрата води є основним показником гідрологічного режиму водойм, оскільки вона визначає загальну водність та інтенсивність водообміну. Зміна середньорічного стоку більше ніж на 15% вказує на суттєві порушення водного балансу, що може бути зумовлено як природними факторами (зміна клімату, засухи), так і антропогенними впливами (відбір води, регулювання стоку). Такі зміни критично впливають на всі компоненти екосистеми, оскільки водність визначає площу оселищ, концентрацію забруднюючих речовин та кисневий режим. Тісно пов'язаний з витратою води рівневий режим водойм має особливе значення для життєвих циклів водних організмів. Порушення природного режиму рівнів може призвести до загибелі ікри риб, знищення прибережної рослинності та зміни структури донних біоценозів. Особливо чутливими до змін рівневого режиму є заплавні екосистеми, де періодичні затоплення є необхідною умовою підтримання біорізноманіття. Завершує групу гідрологічних критеріїв швидкість течії, що впливає на процеси самоочищення водойм, транспорт наносів та кисневий режим. Зміна швидкісного режиму більше ніж на 25% може призвести до зміни типу екосистеми (наприклад, перетворення проточної водойми на застійну), що супроводжується кардинальною перебудовою біологічних угруповань.

Переходячи до фізико-хімічних критеріїв, слід підкреслити їх ключову роль у визначенні якості водного середовища та його придатності для існування живих організмів. Розчинений кисень є критично важливим параметром для існування аеробних організмів, адже його дефіцит створює каскадний ефект негативних змін у всій екосистемі. Зниження концентрації кисню нижче 6 мг/л створює стресові умови для більшості видів риб та безхребетних, призводячи до масової загибелі гідробіонтів. Дефіцит кисню часто виникає внаслідок евтрофікації, органічного забруднення або підвищення температури води. Не менш важливим є водневий показник (рН) водного середовища, що повинен знаходитися в діапазоні 6,5-8,5 для підтримання нормальних фізіологічних процесів у водних організмів. Вихід рН за межі цього діапазону може бути зумовлений кислотними дощами, скидами промислових стоків або інтенсивним розвитком водоростей, при цьому зміна рН впливає на розчинність токсичних речовин та доступність поживних елементів. Доповнюють картину хімічного стану води показники електропровідності, що характеризує загальну мінералізацію води та може вказувати на надходження забруднюючих речовин, та прозорості води, яка відображає наявність завислих речовин та розвиток фітопланктону. Різкі зміни електропровідності свідчать про порушення природного хімічного складу води, тоді як зміна прозорості більше ніж на 50% може вказувати на евтрофікацію, ерозійні процеси в басейні або техногенне забруднення.

Найбільш інтегральними та чутливими індикаторами стану водних екосистем є біологічні критерії, що відображають відгук живих організмів на зміни середовища існування. Індекс Шеннона (індекс різноманітності) характеризує структуру та різноманітність біологічних угруповань, виступаючи універсальним показником екологічного благополуччя. Зниження цього індексу більше ніж на 20% свідчить про деградацію екосистеми, втрату видів та спрощення трофічних зв'язків, при цьому даний показник особливо чутливий до токсичного забруднення та зміни умов середовища. Паралельно з індексом різноманітності використовується індекс сапробності, що відображає ступінь органічного забруднення водойми на основі співвідношення індикаторних видів. Зміна класу сапробності (наприклад, з олігосапробного на мезосапробний) вказує на погіршення якості води та зміну трофічного статусу водойми. Найбільш детальну інформацію про стан екосистеми надає аналіз структури угруповань через видовий склад, чисельність та біомасу різних груп організмів. Випадіння видів-індикаторів (особливо стенобіонтних видів) є надійним показником деградації екосистеми, оскільки ці види першими реагують на негативні зміни умов середовища.

На основі аналізу наукової літератури визначено основні фактори, що спричиняють трансформаційні зміни водних екосистем: антропогенні фактори, кліматичні зміни та воєнні дії. Враховуючи комплексний характер впливу визначених факторів на водні екосистеми, було проаналізовано їх взаємозв'язки та кумулятивний ефект (табл. 2). Розгляд комбінованого впливу факторів є важливим з кількох причин, включаючи синергетичний ефект, коли два чи більше факторів діють разом, їх сумарний вплив часто перевищує простий адитивний ефект.

Дослідження взаємодії різних факторів впливу на водні екосистеми виявляє складні синергетичні ефекти, що значно перевищують простий адитивний вплив окремих чинників. Комбінований вплив урбанізації та кліматичних змін створює особливо небезпечні умови для водних екосистем, де посилення евтрофікації відбувається одночасно через декілька взаємопов'язаних механізмів. Підвищення температури води внаслідок кліматичних змін прискорює біохімічні процеси та розвиток фітопланктону, тоді як урбанізація збільшує надходження біогенних елементів (азоту та фосфору) з поверхневими стоками. Критичним показником цього процесу є збільшення концентрації фосфатів понад 0,2 мг/л, що призводить до масового розвитку водоростей та порушення кисневого режиму.

Таблиця 2

Взаємозв'язки та кумулятивний ефект основних факторів впливу на водні екосистеми

Комбінація факторів	Характер кумулятивного впливу	Індикатори впливу
Урбанізація + Кліматичні зміни	– посилення евтрофікації через підвищення температури та надходження біогенних елементів; – зміна гідрологічного режиму через порушення інфільтрації; – порушення кисневого режиму.	– збільшення концентрації фосфатів >0.2 мг/л; – зниження водності на 15-20%; – зменшення розчиненого кисню <6 мг/л.
Урбанізація + Воєнні дії	– комплексне забруднення через руйнування інфраструктури; – порушення процесів самоочищення; – акумуляція токсикантів у донних відкладах.	– перевищення ГДК за нафтопродуктами у 2-3 рази; – зниження індексу сапробності; – накопичення важких металів у седиментах.
Кліматичні зміни + Воєнні дії	– пришвидшення деградації екосистем; – збільшення площі впливу забруднень; – порушення біологічних циклів.	– зміна видового складу на 20-30%; – розширення ареалу забруднень; – зміщення фенологічних фаз.

Примітка: складено авторами за даними [18, 23, 33].

Паралельно відбувається зміна гідрологічного режиму через порушення природної інфільтрації внаслідок урбанізації (збільшення непроникних поверхонь) та зміни режиму опадів через кліматичні зміни, що призводить до зниження водності на 15-20% та зміни сезонного розподілу стоку. Додатково порушується кисневий режим як наслідок підвищення температури води (кисень менше розчиняється у теплій воді) та збільшення органічного навантаження від урбанізованих територій, при цьому зменшення концентрації розчиненого кисню нижче 6 мг/л створює критичні умови для існування аеробних організмів.

Не менш драматичними є наслідки поєднання урбанізації та воєнних дій, що характеризується особливо руйнівним впливом на водні екосистеми через комплексне забруднення, яке виникає через руйнування промислової та комунальної інфраструктури в урбанізованих районах під час військових конфліктів. Це призводить до неконтрольованого надходження різноманітних токсикантів у водні об'єкти, при цьому перевищення ГДК за нафтопродуктами у 2-3 рази є типовим наслідком руйнування нафтосховищ, АЗС та транспортної інфраструктури. Одночасно відбувається порушення процесів самоочищення через фізичне руйнування біологічних угруповань та накопичення токсичних речовин, що пригнічують життєдіяльність мікроорганізмів, відповідальних за деструкцію органічних забруднень. Особливо тривожною є акумуляція токсикантів у донних відкладах, що створює довготривалий резервуар забруднення, здатний впливати на екосистему протягом десятиліть, особливо небезпечним при цьому є накопичення важких металів, які не піддаються біологічному розкладу.

Третя комбінація факторів - поєднання кліматичних змін та воєнних дій - призводить до прискорення деградації екосистем через одночасний вплив стресових кліматичних умов (посухи, екстремальні температури) та токсичного забруднення від воєнних дій, при цьому зміна видового складу на 20-30% є типовим наслідком такого комбінованого впливу. Кліматичні фактори сприяють збільшенню площі впливу забруднень через посилення вітрів та зміну режиму опадів, що розповсюджує забруднюючі речовини на більші території. Водночас відбувається порушення біологічних циклів, що проявляється у зміщенні фенологічних фаз (періодів розмноження, міграції) внаслідок кліматичних змін, що особливо критично в умовах додаткового стресу від воєнних дій.

Значення аналізу кумулятивних ефектів полягає в можливості коротшого прогнозування наслідків для екосистем, розробки ефективніших заходів з управління та охорони водних ресурсів, встановлення пріоритетів при плануванні природоохоронних дій. Комбінації факторів часто призводять до прискорення деградації екосистем та розширення масштабів впливу, при цьому відновлення екосистем при комбінованому впливі кількох факторів стає складнішим і тривалішим процесом, оскільки необхідно усувати наслідки дії всіх факторів одночасно. Це вимагає комплексного підходу до управління водними ресурсами та міжсекторальної координації зусиль. Розуміння механізмів кумулятивного впливу є критично важливим для розробки ефективних стратегій адаптації до глобальних змін та мінімізації негативних наслідків для водних екосистем, тому запропонована система критеріїв та аналіз факторів впливу створюють теоретичну основу для практичного управління водними ресурсами в умовах множинних стресових впливів.

Розроблена система критеріїв оцінки трансформаційних змін водних екосистем створює методологічну основу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері природокористування. Використання кількісних індикаторів (зміна середньорічного стоку >15%, концентрація кисню <6 мг/л, зниження індексу Шеннона >20%) дозволяє оперативно реагувати на критичні зміни стану водних об'єктів та приймати превентивні заходи. Особливо важливим є врахування кумулятивних ефектів при розробці стратегій управління, оскільки поєднання урбанізації,

кліматичних змін та воєнних дій створює синергетичні впливи, що значно перевищують простий адитивний ефект окремих факторів.

Дозвільна діяльність в екології повинна базуватися на комплексній оцінці стану водних екосистем з використанням розроблених критеріїв. Це дозволить встановлювати диференційовані умови спеціального водокористування залежно від рівня трансформаційних змін конкретної водойми. Нормування антропогенного навантаження має здійснюватися з урахуванням не лише фізико-хімічних показників, але й біологічних індикаторів, які найбільш чутливо реагують на зміни екосистемного стану. Економічне обґрунтування природоохоронних технологій повинно включати оцінку їх ефективності в контексті запобігання незворотним трансформаціям водних екосистем, що може запобігти значним економічним втратам у майбутньому.

Міжсекторальна координація є критично важливою для ефективного управління водними ресурсами в умовах множинних стресових впливів. Це вимагає інтеграції водного менеджменту в регіональне планування, координації між промисловістю, сільським господарством та комунальним сектором. Зелений бізнес та екологічне підприємництво можуть відігравати ключову роль у впровадженні інноваційних рішень для мінімізації негативного впливу на водні екосистеми. Організація управління в екологічній діяльності повинна передбачати створення інтегрованих систем моніторингу та раннього попередження, що дозволить оперативно виявляти ознаки трансформаційних змін та приймати адекватні управлінські рішення для забезпечення сталого розвитку водних ресурсів.

Висновки

1. Проведене дослідження дозволило сформулювати комплексне розуміння феномену трансформаційних змін водних екосистем та розробити науково обґрунтовану систему їх оцінки. Систематизація понад 2835 наукових публікацій та бібліометричний аналіз підтвердили зростаючу актуальність проблематики трансформаційних змін водних екосистем у світовому науковому дискурсі, особливо з початку 2000-х років.

2. Термінологічний аналіз засвідчив правомірність використання терміну "трансформаційні зміни водних екосистем" як усталеного наукового поняття з особливим змістовим навантаженням, що відрізняє його від загального поняття "трансформація". Запропоноване визначення трансформаційних змін як суттєвих, часто незворотних змін у структурі, функціонуванні та екологічній стабільності водних середовищ узгоджується з міжнародною науковою практикою та відображає специфіку цих процесів.

3. Розроблена система критеріїв оцінки трансформації водних екосистем, що включає гідрологічні, фізико-хімічні та біологічні показники, забезпечує комплексний підхід до моніторингу та діагностики стану водних екосистем. Встановлені кількісні індикатори трансформації (зміна середньорічного стоку >15%, концентрація кисню <6 мг/л, зниження індексу Шеннона >20% тощо) дозволяють об'єктивно оцінювати ступінь трансформаційних змін та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

4. Аналіз кумулятивних ефектів виявив, що поєднання різних факторів впливу (урбанізація, кліматичні зміни, воєнні дії) створює синергетичні ефекти, що значно перевищують простий адитивний вплив окремих чинників. Особливо небезпечними є комбінації урбанізації з кліматичними змінами (посилення евтрофікації), урбанізації з воєнними діями (комплексне забруднення) та кліматичних змін з воєнними діями (прискорення деградації екосистем).

5. Встановлено, що найбільш інтегральними та чутливими індикаторами стану водних екосистем є біологічні критерії, які відображають відгук живих організмів на зміни середовища існування. Водно-болотні угіддя визначено як найбільш вразливі компоненти водних екосистем, що потребують особливих підходів до оцінки та збереження в контексті трансформаційних змін.

6. Науково обґрунтовано необхідність переходу від фрагментарних підходів до комплексної системи управління водними ресурсами, що враховує взаємозв'язки між різними факторами впливу та їх кумулятивні ефекти, особливо в умовах сучасних викликів, пов'язаних з воєнними діями та кліматичними змінами.

7. Розроблено практичні рекомендації щодо прийняття управлінських рішень на основі встановлених критеріїв оцінки трансформаційних змін водних екосистем. Запропоновано використання кількісних індикаторів для оперативного реагування на критичні зміни стану водних об'єктів у системі дозвільної діяльності та нормування антропогенного навантаження. Обґрунтовано необхідність міжсекторальної координації та інтеграції водного менеджменту в регіональне планування для забезпечення ефективного управління водними ресурсами в умовах множинних стресових впливів.

Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що розроблена концептуальна рамка та система критеріїв оцінки трансформаційних змін водних екосистем створюють методологічну основу для удосконалення системи екологічного моніторингу водних об'єктів України відповідно до вимог Водної рамкової директиви ЄС. Запропоновані кількісні індикатори трансформації можуть бути інтегровані в існуючі програми моніторингу водних ресурсів для раннього виявлення критичних змін у водних екосистемах та прийняття превентивних заходів. Результати дослідження забезпечують науково-методичне підґрунтя для оптимізації дозвільної діяльності в екології та нормування

антропогенного навантаження на водні об'єкти з урахуванням їх екосистемного стану. Розроблені критерії можуть використовуватися для економічного обґрунтування природоохоронних технологій та впровадження принципів зеленого бізнесу у водогосподарській діяльності. Результати дослідження забезпечують науково-методичне підґрунтя для розробки басейнових планів управління водними ресурсами, стратегій адаптації до кліматичних змін та програм відновлення водних екосистем в умовах воєнних дій. Систематизовані підходи до оцінки кумулятивних ефектів дозволяють оптимізувати розподіл ресурсів при плануванні природоохоронних заходів та пріоритизувати найбільш ефективні втручання для запобігання деградації водних екосистем..

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою інноваційних технологій дистанційного моніторингу водних екосистем з використанням супутникових даних та IoT-сенсорів для автоматизованого виявлення ознак трансформаційних змін у режимі реального часу. Актуальним є створення математичних моделей прогнозування траєкторій трансформації водних екосистем під впливом множинних стресових факторів та розробка сценаріїв їх розвитку в умовах змін клімату. Перспективним напрямом є удосконалення методів економічного обґрунтування природоохоронних технологій з урахуванням екосистемних послуг водних об'єктів та розробка інструментів для оцінки ефективності інвестицій у зелений бізнес та екологічне підприємництво водогосподарської галузі. Важливим є дослідження організаційно-правових механізмів управління в екологічній діяльності для забезпечення ефективної реалізації нормативів антропогенного навантаження та дозвільної діяльності на основі розроблених критеріїв.

Література

1. Allan J.D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2004. Vol. 35. P. 257-284. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>
2. Carpenter S.R., Ludwig D., Brock W.A. Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change. *Ecological Applications*. 1999. Vol. 9, No. 3. P. 751-771. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1999\)009\[0751:MOEFLS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1999)009[0751:MOEFLS]2.0.CO;2)
3. Carpenter S.R., Stanley E.H., Vander Zanden M.J. State of the world's freshwater ecosystems: physical, chemical, and biological changes. *Annual Review of Environment and Resources*. 2011. Vol. 36, No. 1. P. 75-99. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021810-094524>
4. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 1997. Vol. 387. P. 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
5. Davidson N.C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*. 2014. Vol. 65, No. 10. P. 934-941. <https://doi.org/10.1071/MF14173>
6. Demchuk L., Kireitseva H., Paliy O., Kahukina A. Toxic impacts of the war on Ukraine. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. Vol. 80. P. 267-276. <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2170582>
7. Döll P., Zhang J. Impact of climate change on freshwater ecosystems: a global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2010. Vol. 14. P. 783-799. <https://doi.org/10.5194/hess-14-783-2010>
8. EN 14614:2020. Water quality - Guidance standard for assessing the hydromorphological features of rivers. European Committee for Standardization. 2020. URL: <https://www.en-standard.eu/bs-en-14614-2020-water-quality-guidance-standard-for-assessing-the-hydromorphological-features-of-rivers/> (дата звернення: 18.06.2025).
9. European Environment Agency. European waters assessment of status and pressures 2018. EEA Report No 7/2018. Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2018. 90 p. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-water> (дата звернення: 15.06.2025).
10. Folke C., Carpenter S., Walker B., Scheffer M., Elmqvist T., Gunderson L., Holling C.S. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2004. Vol. 35. P. 557-581. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711>
11. Gunderson L.H., Holling C.S. *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington, DC. 2002. 507 p. URL: <https://islandpress.org/books/panarchy> (дата звернення: 18.06.2025).
12. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973. Vol. 4. P. 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
13. Hughes T.P., Carpenter S., Rockström J., Scheffer M., Walker B. Multiscale regime shifts and planetary boundaries. *Trends in Ecology & Evolution*. 2013. Vol. 28, No. 7. P. 389-395. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.05.019>
14. IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge

- University Press, Cambridge, UK. 2022. 3056 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (дата звернення: 22.06.2025).
15. ISO 5667-1:2020. Water quality — Sampling. Part 1: Guidance on the design of sampling programmes and sampling techniques. International Organization for Standardization. 2020. URL: <https://www.iso.org/standard/72369.html> (дата звернення: 20.06.2025).
16. Jiang P., Xia H., He Z., Wang Z. Design of a water environment monitoring system based on wireless sensor networks. *Sensors*. 2009. Vol. 9, No. 8. P. 6411-6434. <https://doi.org/10.3390/s90806411>
17. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, № 3. P. s378-s395. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.0703ukr19>
18. Kireitseva H., Šerevičienė V., Khrutba V., Zamula I. Internal and external factors of use and conservation of water resources in Zhytomyr region. *Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, № 1. P. 43-50. <https://doi.org/10.23939/ep2024.01.043>
19. Liu Y., Yang H., Wang Z. A comprehensive framework for water quality monitoring using IoT and machine learning. *Water Research*. 2020. Vol. 186. Article 116387. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116387>
20. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis. World Resources Institute, Washington, DC. 2005. 68 p. URL: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8735> (дата звернення: 12.06.2025).
21. Mitryasova O., Pohrebennyk V., Petrov O.S., Bezsonov Y., Smyrnov V.M. Environmental water security policy in the EU, Ukraine and other developing countries. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 2. P. 125-130. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/125>
22. Mitsch W.J., Gosselink J.G. Wetlands. 5th ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. 2015. 736 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Wetlands%2C+5th+Edition-p-9781118676820> (дата звернення: 08.06.2025).
23. Paul M.J., Meyer J.L. Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 2001. Vol. 32, No. 1. P. 333-365. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040>
24. Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. 2016. Vol. 540. P. 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
25. Ramsar Convention Secretariat. The Ramsar Convention Manual: a guide to the Convention on Wetlands. 6th ed. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland. 2013. 112 p. URL: <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-e.pdf> (дата звернення: 25.06.2025).
26. Scheffer M., Carpenter S.R., Foley J.A., Folke C., Walker B. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*. 2001. Vol. 413. P. 591-596. <https://doi.org/10.1038/35098000>
27. 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, № 4. P. 227-234. <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.227>
28. Tulbure M.G., Broich M., Stehman S.V., Kommareddy A. Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 178. P. 142-157. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.034>
29. Vörösmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O., Dudgeon D., Prusevich A., Green P., Glidden S., Bunn S.E., Sullivan C.A., Liermann C.R., Davies P.M. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*. 2010. Vol. 467. P. 555-561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
30. Walker B., Holling C.S., Carpenter S.R., Kinzig A. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*. 2004. Vol. 9, No. 2. Article 5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
31. Walsh C.J., Roy A.H., Feminella J.W., Cottingham P.D., Groffman P.M., Morgan R.P. 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. <https://doi.org/10.1899/04-028.1>
32. Zamula I.V., Shavurska O.V., Kireitseva H.V. Sustainable Development of Ukraine as an Innovative Approach to Its Post-War Recovery. *Science and Innovation*. 2024. Vol. 20, № 3. P. 3-16. <https://doi.org/10.15407/scine20.03.003>
33. Водна рамкова директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення. Київ. 2006. 240 с. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962 (дата звернення: 16.06.2025).
34. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ: Ніка-Центр, 2010. 316 с. URL: <https://nika-center.kiev.ua/books/grebin-water-regime> (дата звернення: 10.06.2025).
35. Кірейцева Г.В. Теоретичні основи управління екологічною безпекою поверхневих водних об'єктів в умовах антропогенного навантаження. *Екологічні науки*. 2024. Вип. 6(57). С. 70-74. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.10>
36. Кірейцева Г.В. Ідентифікація ризиків реалізації водної стратегії міських громад. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. № 347(1). С. 603-611. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-84>

37. Кірейцева Г.В., Герасимчук О.Л., Скиба Г.В., Хоменко С.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю. Біоіндикаційна оцінка екологічного стану р. Кам'янка в м. Житомирі за допомогою MIR-індексу. Вісник Кременчуцького Національного університету імені Михайла Остроградського. 2024. Випуск 3(146). С. 58-65. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.3.8>
38. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Герасимчук О.Л., Скиба Г.В., Хоменко С.В. ГАР-аналіз водокористування у контексті запобігання евтрофікації річки Тетерів в межах урбоєкосистеми м. Житомира. Екологічні науки. 2024. Вип. 4(55). С. 53-58. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.9>
39. Осадчий В.І., Набиванець Б.Й., Осадча Н.М., Набиванець Ю.Б. Гідрохімічний довідник. Поверхневі води суходолу. Київ: Ніка-Центр, 2008. 616 с. URL: <https://nika-center.kiev.ua/books/hydrochemical-reference> (дата звернення: 20.06.2025).
40. Хільчевський В.К., Гончарук В.В., Юрасов С.М. Гідрохімія України. Київ: Ніка-Центр, 2009. 308 с. URL: <https://nika-center.kiev.ua/books/hydrochemistry-ukraine> (дата звернення: 14.06.2025).

References

1. Allan J.D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2004. Vol. 35. P. 257-284. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>
2. Carpenter S.R., Ludwig D., Brock W.A. Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change. *Ecological Applications*. 1999. Vol. 9, No. 3. P. 751-771. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1999\)009\[0751:MOEFLS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1999)009[0751:MOEFLS]2.0.CO;2)
3. Carpenter S.R., Stanley E.H., Vander Zanden M.J. State of the world's freshwater ecosystems: physical, chemical, and biological changes. *Annual Review of Environment and Resources*. 2011. Vol. 36, No. 1. P. 75-99. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021810-094524>
4. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 1997. Vol. 387. P. 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
5. Davidson N.C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*. 2014. Vol. 65, No. 10. P. 934-941. <https://doi.org/10.1071/MF14173>
6. Demchuk L., Kireitseva H., Paliy O., Kahukina A. Toxic impacts of the war on Ukraine. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. Vol. 80. P. 267-276. <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2170582>
7. Döll P., Zhang J. Impact of climate change on freshwater ecosystems: a global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2010. Vol. 14. P. 783-799. <https://doi.org/10.5194/hess-14-783-2010>
8. EN 14614:2020. Water quality - Guidance standard for assessing the hydromorphological features of rivers. European Committee for Standardization. 2020. URL: <https://www.en-standard.eu/bs-en-14614-2020-water-quality-guidance-standard-for-assessing-the-hydromorphological-features-of-rivers/> (дата звернення: 18.06.2025).
9. European Environment Agency. European waters assessment of status and pressures 2018. EEA Report No 7/2018. Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2018. 90 p. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-water> (дата звернення: 15.06.2025).
10. Folke C., Carpenter S., Walker B., Scheffer M., Elmqvist T., Gunderson L., Holling C.S. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2004. Vol. 35. P. 557-581. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711>
11. Gunderson L.H., Holling C.S. *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington, DC. 2002. 507 p. URL: <https://islandpress.org/books/panarchy> (дата звернення: 18.06.2025).
12. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973. Vol. 4. P. 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
13. Hughes T.P., Carpenter S., Rockström J., Scheffer M., Walker B. Multiscale regime shifts and planetary boundaries. *Trends in Ecology & Evolution*. 2013. Vol. 28, No. 7. P. 389-395. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.05.019>
14. IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2022. 3056 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (дата звернення: 22.06.2025).
15. ISO 5667-1:2020. Water quality — Sampling. Part 1: Guidance on the design of sampling programmes and sampling techniques. International Organization for Standardization. 2020. URL: <https://www.iso.org/standard/72369.html> (дата звернення: 20.06.2025).
16. Jiang P., Xia H., He Z., Wang Z. Design of a water environment monitoring system based on wireless sensor networks. *Sensors*. 2009. Vol. 9, No. 8. P. 6411-6434. <https://doi.org/10.3390/s90806411>
17. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, № 3. P. s378-s395. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.0703ukr19>
18. Kireitseva H., Šerevičienė V., Khrutba V., Zamula I. Internal and external factors of use and conservation of water resources in Zhytomyr region. *Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, № 1. P. 43-50. <https://doi.org/10.23939/ep2024.01.043>
19. Liu Y., Yang H., Wang Z. A comprehensive framework for water quality monitoring using IoT and machine learning. *Water Research*. 2020. Vol. 186. Article 116387. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116387>
20. Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC. 2005. 68 p. URL: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8735> (дата звернення: 12.06.2025).
21. Mitryasova O., Pohrebennyk V., Petrov O.S., Bezsonov Y., Smyrnov V.M. Environmental water security policy in the EU, Ukraine and other developing countries. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 2. P. 125-130. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/125>
22. Mitsch W.J., Gosselink J.G. *Wetlands*. 5th ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. 2015. 736 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Wetlands%2C+5th+Edition-p-9781118676820> (дата звернення: 08.06.2025).
23. Paul M.J., Meyer J.L. Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 2001. Vol. 32, No. 1. P. 333-365. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040>
24. Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. 2016. Vol. 540. P. 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
25. Ramsar Convention Secretariat. *The Ramsar Convention Manual: a guide to the Convention on Wetlands*. 6th ed. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland. 2013. 112 p. URL: <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-e.pdf> (дата звернення: 25.06.2025).

26. Scheffer M., Carpenter S.R., Foley J.A., Folke C., Walker B. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*. 2001. Vol. 413. P. 591-596. <https://doi.org/10.1038/35098000>
27. 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, № 4. P. 227-234. <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.227>
28. Tulbure M.G., Broich M., Stehman S.V., Kommareddy A. Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 178. P. 142-157. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.034>
29. Vörösmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O., Dudgeon D., Prusevich A., Green P., Glidden S., Bunn S.E., Sullivan C.A., Liermann C.R., Davies P.M. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*. 2010. Vol. 467. P. 555-561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
30. Walker B., Holling C.S., Carpenter S.R., Kinzig A. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*. 2004. Vol. 9, No. 2. Article 5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
31. Walsh C.J., Roy A.H., Feminella J.W., Cottingham P.D., Groffman P.M., Morgan R.P. 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. <https://doi.org/10.1899/04-028.1>
32. Zamula I.V., Shavurska O.V., Kireitseva H.V. Sustainable Development of Ukraine as an Innovative Approach to Its Post-War Recovery. *Science and Innovation*. 2024. Vol. 20, № 3. P. 3-16. <https://doi.org/10.15407/scine20.03.003>
33. Водна рамкова директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення. Київ. 2006. 240 с. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962 (дата звернення: 16.06.2025).
34. Water Framework Directive of the EU 2000/60/EC. Basic terms and their definitions. Kyiv. 2006. 240 p. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962 (accessed: 16.06.2025).
35. Grebin V.V. Modern water regime of rivers of Ukraine (landscape-hydrological analysis). Kyiv: Nika-Center, 2010. 316 p. URL: <https://nika-center.kiev.ua/books/grebin-water-regime> (accessed: 10.06.2025).
36. Kireitseva H.V. Theoretical foundations of ecological safety management of surface water bodies under anthropogenic load conditions. *Ecological Sciences*. 2024. Issue 6(57). P. 70-74. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.10>
37. Kireitseva H.V. Risk identification for water strategy implementation in urban communities. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. № 347(1). P. 603-611. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-84>
38. Kireitseva H.V., Herasymchuk O.L., Skyba H.V., Khomenko S.V., Tsyhanenko-Dziubenko I.Yu. Bioindication assessment of the ecological state of the Kamianka River in Zhytomyr using the MIR-index. *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2024. Issue 3(146). P. 58-65. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.3.8>
39. Kireitseva H.V., Tsyhanenko-Dziubenko I.Yu., Herasymchuk O.L., Skyba H.V., Khomenko S.V. GAP-analysis of water use in the context of preventing eutrophication of the Teteriv River within the urban ecosystem of Zhytomyr. *Ecological Sciences*. 2024. Issue 4(55). P. 53-58. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.9>
40. Osadchyi V.I., Nabyvanets B.Y., Osadcha N.M., Nabyvanets Yu.B. Hydrochemical reference book. Surface waters of land. Kyiv: Nika-Center, 2008. 616 p. URL: <https://nika-center.kiev.ua/books/hydrochemical-reference> (accessed: 20.06.2025).
- Khilchevskyi V.K., Honcharuk V.V., Yurasov S.M. *Hydrochemistry of Ukraine*. Kyiv: Nika-Center, 2009. 308 p. URL: <https://nika-center.kiev.ua/books/hydrochemistry-ukraine> (accessed: 14.06.2025).