УДК 504.4.054:355.01(477.63)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.21

ПРОСТОРОВА ТИПІЗАЦІЯ ТА ІНТЕГРАЛЬНЕ РАНЖУВАННЯ ХІМІЧНОГО, БІОЛОГІЧНОГО І РАДІАЦІЙНО-ЯДЕРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ВОДОСХОВИЩЕ – ДЖЕРЕЛО ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

Кравченко О.В.[1] (orcid.org/0000-0001-6289-0641),
Кобилянський В.Я.[2] (orcid.org/0000-0001-6279-2136),
Маркіна Л.М.[3] (orcid.org/0000-0003-3632-1685)
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури
пр. Повітряних Сил, 31, 03037, м. Київ
[2]ТОВ «Науково-аналітичний центр якості води»
пров. Микитинський, 33, 61001, м. Харків
[3]Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп 2, 03035, м. Київ
kravchenko.ov@knuba.edu.ua; vodocentr@gmail.com, markserg@ukr.net

Запропоновано методичний підхід до просторової типізації та інтегрального ранжування хімічного, біологічного і радіаційно-ядерного (ХБРЯ) навантаження на водосховище, що використовується як джерело централізованого питного водопостачання. Підхід побудовано на моделі «джерело – шлях перенесення – реципієнт» і зорієнтовано на екологічні, а не технологічні критерії оцінювання. Ключовою відмінністю запропонованої конструкції є розмежування двох незалежних вимірів ризику, які в галузевих оцінках зазвичай змішуються: власної екологічної небезпеки речовини, вираженої через індекс екологічної небезпеки ІЕН = $T + B + P$ – суму бальних оцінок прямої екотоксичності, здатності до біоакумуляції та персистентності, а також бальної оцінки ймовірності надходження цієї речовини у водний об'єкт. Таке розмежування дозволяє коректно зіставляти сценарії застосування зброї масового ураження, що мають високу тяжкість наслідків за низької ймовірності настання, з постійно діючими джерелами, які поступаються за одиничним ефектом, проте діють безперервно. Підхід апробовано для ділянки Дніпровського (Запорізького) водосховища в зоні можливого впливу на питні водозабори м. Дніпро. Виконано типізацію тринадцяти груп джерел надходження ХБРЯ-навантаження з урахуванням положення цих джерел відносно точок водозабору та домінуючого механізму перенесення забруднювальних речовин; оцінено двадцять чотири групи речовин-індикаторів. Установлено, що найвищі значення інтегрального показника можуть формуватися не через сценарії застосування зброї масового ураження (R = 5–8 балів, низький клас), а через постійно діючі джерела, вплив яких посилюється воєнними чинниками: уранові хвостосховища колишнього Придніпровського хімічного заводу (R = 24), автохтонні внутрішньоводоймні процеси (R = 23), скиди промислових підприємств басейну (R = 21), застосування конвенційних боєприпасів (R = 20) та агрохімічне навантаження (R = 18). Показано визначальне значення просторового чинника: Запорізька АЕС, розташована нижче за течією, не створює для досліджуваних водозаборів гідрологічного ризику, і її внесок може реалізуватися виключно через атмосферні випадання, тоді як уранові хвостосховища, розташовані вище за течією за 0,8–4,4 км від русла, формують імовірний канал безперервного надходження радіонуклідів. Аналіз чутливості підтвердив правильність основного висновку за варіації експертної оцінки ймовірності в межах усієї шкали. *Ключові слова:* екологічний ризик, ХБРЯ-навантаження, ранжування джерел надходження забруднювальних речовин, індекс екологічної небезпеки, Дніпровське водосховище, питне водопостачання, воєнні дії.

Spatial classification and integrated ranking of sources of chemical, biological and radiological-nuclear loading on a reservoir used as a drinking water source. Kravchenko O., Kobylianskyi V., Markina L.

A methodological approach to the spatial classification and integrated ranking of sources of chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) loading on a reservoir used as a centralised drinking water source is proposed. The approach builds on the source–pathway–receptor model and relies on ecological rather than technological assessment criteria. Its distinctive feature is the separation of two independent dimensions of risk that are usually merged in sectoral assessments: the intrinsic ecological hazard of a substance, expressed by the ecological hazard index EHI = T + B + P as the sum of scores for direct ecotoxicity, bioaccumulation potential and persistence, and the score for the likelihood of release into the water body. This separation makes it possible to compare, on a common scale, weapons-of-mass-destruction scenarios, which combine severe consequences with a low likelihood of occurrence, and continuously acting sources, which are weaker in a single event but operate without interruption. The approach was applied to the section of the Dnipro (Zaporizhzhia) Reservoir influenced by the drinking water intakes of the city of Dnipro. Thirteen groups of sources were classified according to their position relative to the abstraction points and the dominant transport mechanism, and twenty-four groups of indicator substances were assessed. The highest values of the integrated indicator were shown to arise not from weapons-of-mass-destruction scenarios (R = 5–8, low class) but from continuously acting sources amplified by war-related factors: the uranium tailings of the former Prydniprovsky Chemical Plant (R = 24), autochthonous in-reservoir processes (R = 23), industrial discharges within the basin (R = 21), the use of conventional munitions (R = 20) and agrochemical loading (R = 18). The decisive role of the spatial factor is demonstrated: the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant, located downstream, poses no hydrological risk to the intakes studied and can contribute only through atmospheric deposition, whereas the uranium tailings located upstream, 0.8–4.4 km from the channel, form a continuously operating pathway of radionuclide input. A sensitivity analysis confirmed that the main conclusion is robust to variation of the expert likelihood score across the entire scale. *Key words:* ecological risk, CBRN loading, source ranking, ecological hazard index, Dnipro Reservoir, drinking water supply, warfare.

© Кравченко О.В., Кобилянський В.Я., Маркіна Л.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Повномасштабна збройна агресія рф проти України перетворила водні джерела водночас на об'єкти цільового ураження, на середовище поширення токсичних забруднень і, як наслідок, на інструмент тиску на цивільне населення. Дніпровський каскад, що акумулює близько 80 % поверхневих водних ресурсів країни, опинився в центрі цього процесу. Проблематику ХБРЯ-забруднення відповідних джерел питного водопостачання донедавна розглядали переважно у прикладній, технологічній площині: як завдання виявлення забруднювача, вибору бар'єрної технології водопідготовки та організації реагування підприємства водопостачання. Такий підхід є необхідним, проте недостатнім. Він описує лише один вузол складної системи (точку водозабору) і залишає поза межами аналізу власне екосистему, у якій забруднювач з'являється, трансформується та перерозподіляється між абіотичними й біотичними компартментами.

Актуальність дослідження. Перелік потенційних ХБРЯ-загроз для будь-якої великої водойми налічує десятки позицій, а ресурси на моніторинг і превентивні заходи завжди обмежені. Це робить завдання обґрунтованого ранжування джерел надходження ХБРЯ-навантаження не академічним, а суто практичним. Водночас наявні галузеві оцінки будуються переважно на критерії гострої токсичності та на можливості видалення речовини наявними технологічними засобами. За такої логіки найбільш небезпечними є бойові отруйні речовини та біоагенти, тоді як чинники, що фактично формують екологічний стан водойми (тривале надходження важких металів, радіонуклідів індустріальної спадщини, біогенне навантаження), залишаються поза увагою. Розроблення оцінкового інструменту, який відображає екологічну, а не технологічну ієрархію загроз, є актуальним завданням екологічної безпеки питного водопостачання в умовах воєнного стану.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана в межах проблематики забезпечення екологічної безпеки систем централізованого питного водопостачання в умовах воєнного стану і відповідає завданням, визначеним Директивою ЄС 2020/2184 щодо ризик-орієнтованого підходу до управління якістю питної води на всьому ланцюжку – від водозбору до споживача. Результати можуть бути використані під час розроблення планів реагування на ХБРЯ-загрози та програм моніторингу поверхневих джерел водопостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Систематичне вивчення впливу війни рф проти України на водні ресурси розпочалося з перших місяців повномасштабного вторгнення. У праці [1] узагальнено характер уражень водної інфраструктури за перші три місяці війни, та сформульовано тезу про глобальний вимір наслідків для цілей сталого розвитку. Оглядові узагальнення [2, 3] кількісно оцінили втрату близько третини накопичених прісноводних запасів країни та втрати екосистемних послуг водних об'єктів. Найбільш повно досліджено наслідки руйнування Каховської греблі: гідрологічний бік катастрофи описано в [4], методологію швидкої екологічної оцінки ризику з опорою на дистанційне зондування застосовано в [5], детальний гідрологічний аналіз наведено в [6]. Ключовим є результат [7]: за узагальненням натурних відборів донних відкладів, супутникових даних і гідродинамічного моделювання встановлено, що на осушеному ложі водосховища залишилося близько 83,3 тис. т високотоксичних важких металів, з яких за перший рік було винесено менше одного відсотка. Можливості дистанційного зондування для оцінки воєнних впливів на водні об'єкти України наведено в [8], глобальний масштаб впливу гірничо-металургійної діяльності на річкові системи – у [9].

Окрему групу становлять праці з екотоксикології специфічних воєнних забруднювачів. Порівняльну токсичність тринітротолуолу й гексогену для гідробіонтів досліджено в [10]; поведінку перхлоратів у водному середовищі та їх вплив на транспорт йодиду – у [11]. Радіологічні аспекти, пов'язані з Запорізькою АЕС, розглянуто в [12, 13]. Оглядові публікації [14, 15] систематизують медико-екологічні наслідки війни, зокрема запроваджуючи поняття «аквациду» – цілеспрямованого руйнування інфраструктури і забруднення водних ресурсів.

Визначення невирішених аспектів загальної проблеми. Переважна більшість наявних досліджень зосереджена на районі нижньої течії Дніпра та зоні колишнього Каховського водосховища. Верхні за течією водосховища Дніпровського каскаду, які живлять розташовані там великі міські водозабори і водночас приймають стік найбільш індустріалізованої частини басейну, залишаються набагато менше вивченими. Крім того, у літературі відсутня уніфікована напівкількісна схема, яка дозволяла б ранжувати різнорідні ХБРЯ-навантаження за екологічними, а не технологічними критеріями та зіставляти між собою, наприклад, гіпотетичне застосування хімічної зброї і тривале розвантаження забруднених підземних вод із хвостосховища. Не формалізованим залишається й просторовий чинник: у наявних переліках загроз джерела надходження забруднювальних речовин зазвичай наводяться без урахування їх положення відносно точок водозабору, унаслідок чого об'єкти, розташовані нижче за течією, помилково включаються до розрахунку гідрологічного ризику.

Новизна. Уперше запропоновано інтегральний показник екологічного ризику ХБРЯ-забруднення водосховища, що конструктивно розмежовує екотоксикологічний вплив речовини та ймовірність її надходження і тому дозволяє зіставляти на єдиній шкалі сценарні (одноразові) та постійно діючі джерела. Уперше виконано типізацію джерел ХБРЯ-навантаження для водозаборів м. Дніпро

з урахуванням просторового положення джерела та домінуючого механізму перенесення забруднювальних речовин. Отримано новий результат щодо ієрархії загроз: показано, що визначальними для екологічного стану водойми є не сценарії застосування зброї масового ураження, а постійно діючі джерела індустріального походження, вплив яких посилюється воєнними чинниками.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонована конструкція індексу є універсальною і може бути застосована до будь-якого поверхневого джерела питного водопостачання, для якого відомі перелік потенційних джерел забруднення та узагальнені екотоксикологічні характеристики речовин-індикаторів. Розмежування понять тяжкості наслідків і ймовірності їх настання узгоджується з логікою критеріїв стійкості, біоакумуляції та токсичності, прийнятих у міжнародній практиці регулювання поводження з хімічними речовинами, і водночас із ризик-орієнтованим підходом планів безпеки питної води, запроваджених Всесвітньою організацією охорони здоров'я.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є ділянка Дніпровського (Запорізького) водосховища в зоні впливу Кайдакської та Ломовської насосно-фільтрувальних станцій м. Дніпро разом із відповідною частиною водозбору. Методологічною основою роботи є концепція оцінки екологічного ризику за схемою «джерело – шлях перенесення – реципієнт», доповнена методами системного аналізу, експертної бальної оцінки, матричного аналізу ризику та геоінформаційного аналізу просторового розміщення потенційних джерел відносно точок водозабору.

Інформаційну базу склали рецензовані публікації, наведені у списку літератури; дані державної статистичної звітності щодо структури посівних площ та найбільших сільськогосподарських виробників Дніпропетровської області; регіональні звіти про стан водних ресурсів; реєстр місць видалення відходів; матеріали досліджень радіонуклідного складу вод у зоні уранових хвостосховищ Дніпродзержинського промислового вузла; результати аналізу донних відкладів Каховського водосховища. Нормативно-технічну базу становили ДСТУ 7369:2013, ДСТУ 8691:2016, ДБН В.2.5-75:2013 та Правила приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення, затверджені наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 01.12.2017 р. № 316.

Побудована концептуальна модель (рис. 1) розмежовує три рівні аналізу.

Джерела ХБРЯ-навантаження відносно акваторії поділено на алохтонні (зовнішні) та автохтонні (внутрішні). Шляхи перенесення включають гідрологічний адвективний перенос за течією, атмосферне випадання й аерозольний перенос, розвантаження забруднених підземних вод, поверхневий змив з водозбору та внутрішньоводоймні процеси. Реципієнтами виступають абіотичні компоненти

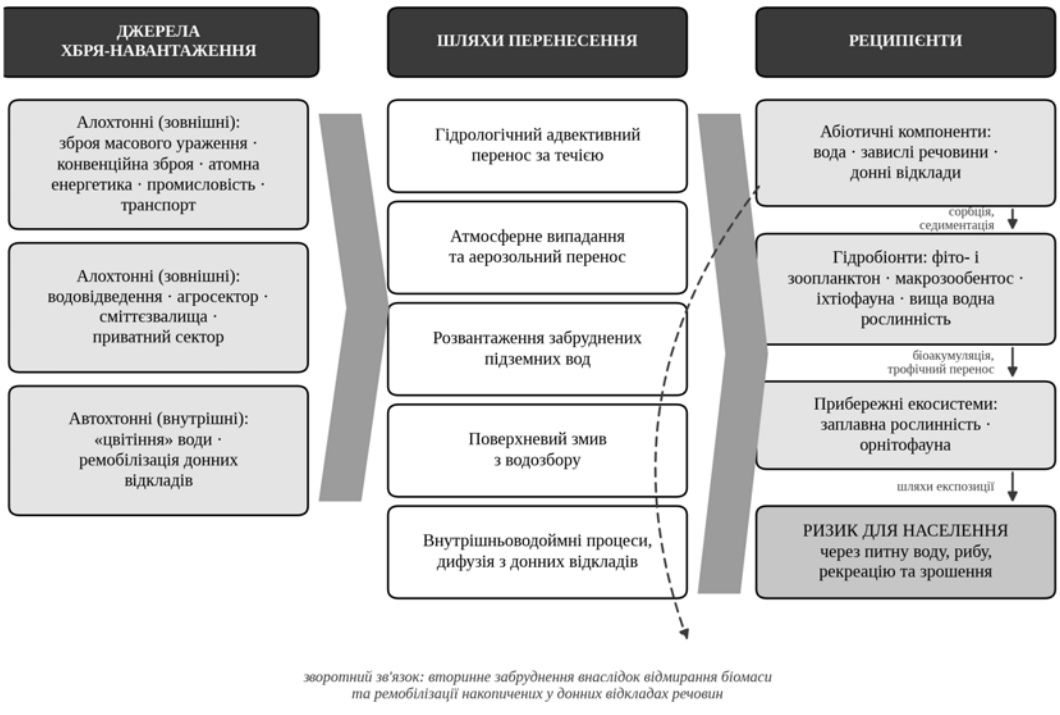

Рис. 1. Концептуальна модель формування ХБРЯ-ризику для екосистеми водосховища – джерела питного водопостачання

водойми, гідробіонти, прибережні екосистеми та населення. Принципово важливим елементом моделі є контур зворотного зв'язку: речовини, що надійшли у водойму, частково сорбуються на завислих частинках і осідають у донних відкладах, а за зміни гідродинамічного та/або гідрохімічного режиму повертаються у товщу води, унаслідок чого водойма зберігає здатність генерувати забруднення навіть після припинення дії первинного джерела його надходження.

Для кожної речовини-індикатора обчислювався індекс екологічної небезпеки (ІЕН):

$$IEH = T + B + P, \quad (1)$$

де T – бальна оцінка прямої екотоксичності для гідробіонтів; B – бальна оцінка здатності до біоакумуляції; P – бальна оцінка персистентності у водному середовищі. Кожна складова може набувати значень від 1 до 3 балів, унаслідок чого ІЕН змінюється в діапазоні 3–9 балів.

Інтегральний показник екологічного ризику групи джерел обчислювався як добуток середнього індексу екологічної небезпеки, характерного для цієї групи набору речовин-індикаторів, на бальну оцінку ймовірності їх надходження:

$$R = W \cdot \text{ІЕН}, \quad (2)$$

де W – бальна оцінка ймовірності реалізації сценарію надходження забруднення у водний об'єкт. Показник R змінюється в діапазоні 3–27 балів; класифікація рівнів ризику: $R \leq 8$ – низький, $9 \leq R \leq 17$ – середній, $R \geq 18$ – високий. Шкали бальних оцінок наведено в табл. 1.

Типізацію джерел виконано з урахуванням двох ознак, які в галузевих оцінках зазвичай не враховуються, а саме: положення джерела відносно точок водозабору та домінуючого механізму перенесення (табл. 2). Саме ці ознаки визначають, чи здатне джерело надходження взагалі вплинути на досліджувану ділянку, і якщо здатне, то з якою затримкою в часі.

Результат типізації дає перший нетривіальний висновок. Запорізька АЕС, яка привертає найбільшу увагу в публічному дискурсі, для водозаборів м. Дніпро не є джерелом гідрологічного ризику взагалі: вона розташована нижче за течією, і будь-яке надходження радіонуклідів у воду в її районі переноситься униз від досліджуваної ділянки, а не до неї. Її внесок може реалізуватися виключно через атмосферне випадання на дзеркало водосховища та водозбір. Натомість уранові хвостосховища колишнього Придніпровського хімічного заводу розташовані вище за течією і формують не сценарний, а безперервно діючий канал надходження. Сумарний показник радіонуклідного забруднення прибережної смуги зростає з 0,80 вище створу хвостосховища «Д» до 1,56–1,90 у створі й нижче за течією, що є прямим свідченням дії цього каналу.

Другий висновок стосується буферної ємності каскаду. Сумарний повний об'єм чотирьох водосховищ, розташованих вище досліджуваної ділянки, зокрема Канівського (2630 млн м³), Кременчуцького (13 500 млн м³), Кам'янського (2450 млн м³) та власне Дніпровського (3300 млн м³), забезпечує суттєве розбавлення імпульсних надходжень. Проте ця ємність працює вибірково. Вона ефективна щодо речовин, які швидко гідролізуються або розкладаються, і практично інертна щодо персистентних біоакумулятивних сполук: розбавлення в товщі води супроводжується їх седиментацією та накопиченням у донних відкладах і трофічних ланцюгах. Іншими словами, каскад радше перерозподіляє забруднення в часі та між компартментами, ніж усуває забруднення.

Результати оцінювання речовин-індикаторів за формулою (1) наведено в табл. 3.

Отримане ранжування істотно розходиться з ієрархією, сформованою в межах технологічного підходу. Отруйні речовини нервово-паралітичної дії (найбільш небезпечний клас забруднювачів) потрапляють до категорії помірної екологічної небезпеки: за високої гострої токсичності вони швидко гідролізуються у воді до нетоксичних складників і не накопичуються в біоті. Навпаки, кадмій і ртуть, які не асоціюються з воєнними діями безпосередньо, отримують максимальні дев'ять балів, оскільки поєднують високу токсичність із високою біоакумуляцією та практично необмеженою персистентністю. Це узгоджується з висновками [7, 9] щодо ролі важких металів як провідного довгострокового чинника.

Таблиця 1

Шкала бальної оцінки складових ІЕН та ймовірності їх надходження у вододжерело

Складова	1 бал	2 бали	3 бали
T – пряма екотоксичність для гідробіонтів	Низька	Середня	Висока
B – здатність до біоакумуляції	Низька	Середня	Висока
P – персистентність у водному середовищі	Коротка (до 1 місяця)	Середня (від 1 до 12 місяців)	Тривала (понад 1 рік)
W – ймовірність надходження у водний об'єкт	Малоймовірне: гіпотетичний сценарій, фактів реалізації не зафіксовано	Можливе: епізодичні аварійні події в межах басейну	Ймовірне: регулярні задокументовані надходження

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Таблиця 2

Типізація джерел ХБРЯ-навантаження для питних водозаборів м. Дніпро

Група джерел надходження	Ключові об'єкти в межах водозбору	Положення відносно водозаборів	Домінуючий шлях перенесення
Зброя масового ураження	Гіпотетичне застосування хімічної, біологічної та ядерної зброї	Не локалізовано	Атмосферне випадання; пряме внесення в акваторію
Конвенційна зброя	Ураження об'єктів у басейні; вибухи в акваторії та на берегах	Вище за течією та в межах акваторії	Пряме внесення; ремобілізація донних відкладів
Атомна енергетика (діючі об'єкти)	Запорізька АЕС	Нижче за течією	Виключно атмосферний
Атомна енергетика (спадщина)	Уранові хвостосховища колишнього Придніпровського хімічного заводу (0,8–4,4 км від русла)	Вище за течією	Розвантаження забруднених підземних вод; поверхневий стік; стік р. Коноплянка
Промисловість	Металургійні, хімічні та коксохімічні підприємства м. Кам'янське; гірничо-металургійний комбінат у зоні р. Самоткань; гірничо-збагачувальні комбінати у басейні р. Псел	Вище за течією	Гідрологічний адвективний перенос
Транспортна інфраструктура	Автомобільні та залізничні мости, річковий порт, трубопроводи	Переважно нижче за течією	Аварійне пряме внесення
Підприємства водовідведення	Каналізаційні очисні споруди міст Київ, Черкаси, Кременчук	Вище за течією (150–600 км)	Гідрологічний перенос із розбавленням у каскаді
Аграрні підприємства	Господарства Петриківського, Царичанського, Магдалинівського, Кам'янського районів	Вище за течією	Поверхневий змив; дренажний стік
Населення	Полігони твердих побутових відходів; приватний сектор без централізованого водовідведення	Розосереджено по водозбору	Інфільтрація в підземні води; поверхневий змив
Автохтонні процеси	Акваторія Дніпровського (Запорізького) водосховища	У межах акваторії	Внутрішньоводоймні процеси; дифузія з донних відкладів

Таблиця 3

Індекс екологічної небезпеки речовин-індикаторів ХБРЯ-забруднення

Група речовин-індикаторів	Т	В	Р	ІЕН	Рівень екологічної небезпеки
Кадмій	3	3	3	9	Надзвичайно високий
Ртуть	3	3	3	9	Надзвичайно високий
Радіонукліди (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{226}Ra, ^{230}Th, ^{210}Pb, ^{210}Po, U)	3	2	3	8	Надзвичайно високий
Стійкі органічні забруднювачі (ПХБ, ПБДЕ, діоксини, ПФАС)	2	3	3	8	Надзвичайно високий
Свинець	2	2	3	7	Високий
Арсен	2	2	3	7	Високий
Патогенні мікроорганізми та ооцисти найпростіших	3	1	3	7	Високий
Ціанотоксини (мікроцистин-LR, анатоксин-a, сакситоксин)	3	2	2	7	Високий
Перхлорати	3	1	3	7	Високий
Інші важкі метали (Ni, Cu, Zn, Cr)	2	1	3	6	Високий
Поліциклічні ароматичні вуглеводні	2	2	2	6	Високий
Пестициди та біоциди	3	2	1	6	Високий
Фармацевтичні препарати	3	2	1	6	Високий
Поверхнево-активні речовини та засоби гігієни	2	2	2	6	Високий
Промислові хімікати, пластифікатори	2	2	2	6	Високий
Вибухові речовини та їх метаболіти (TNT, RDX, HMX)	3	1	2	6	Високий
Нафтопродукти (мазути)	3	1	1	5	Помірний
Мастила та гідравлічні рідини	2	1	2	5	Помірний
Органічні розчинники	3	1	1	5	Помірний
Вуглеводні вугільного походження	1	1	3	5	Помірний
Мікропластик	1	1	3	5	Помірний
Азбест	1	1	3	5	Помірний
Неочищені стічні води (органічне та біогенне навантаження)	2	1	2	5	Помірний
Отруйні речовини нервово-паралітичної дії	3	1	1	5	Помірний

Результати розрахунку інтегрального показника за формулою (2) наведено в табл. 4 та у графічному вигляді на рис. 2.

Отримана картина є основним результатом роботи. Сценарії застосування зброї масового ураження, які традиційно домінують у документах з ХБРЯ-захисту, посідають три останні позиції ранжування з показниками 5–8 балів, тобто належать до низького класу ризику. Необхідно відмітити, що під ядерним вибухом в цій роботі розглядається виключно тактична ядерна зброя, використання якої ворогом гіпотетично можливе на театрі воєнних дій. Це не означає, що ними можна нехтувати: наслідки їх реалізації були б катастрофічними, і саме тому вони мають залишатися предметом планів реагування. Але з погляду формування фактичного екологічного стану водойми вони не є визначальними.

Визначальними виявляються постійно діючі джерела, вплив яких посилюється воєнними чинниками. Найбільш впливовими і небезпечними є уранові хвостосховища колишнього Придніпровського хімічного заводу (R = 24). Це не воєнне джерело за

Таблиця 4

Інтегральна оцінка екологічного ризику ХБРЯ-забруднення за групами джерел

Джерело ХБРЯ-навантаження	Речовини-індикатори	ІЕН сер.	W	R	Клас ризику
Уранові хвостосховища ПХЗ (спадщина)	^{238}U, ^{226}Ra, ^{230}Th, ^{210}Pb, ^{210}Po	8,0	3	24	Високий
Автохтонні процеси у водоймі	Мікроцистин-LR, Cd, Hg, СОЗ і ПАВ донних відкладів	7,5	3	23	Високий
Промислові підприємства басейну	Cd, Hg, Pb, As, Ni, ПАВ, феноли	7,1	3	21	Високий
Конвенційна зброя	TNT, RDX, перхлорати, діоксини, метали корпусів	6,8	3	20	Високий
Агрохімічне навантаження	Пестициди, нітрати, фосфати	6,0	3	18	Високий
Виведення з ладу очисних споруд (воєнний сценарій)	Патогени, органічне і біогенне навантаження, ПАР, фармпрепарати	6,0	3	18	Високий
Аварія на АЕС (атмосферний шлях)	^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{60}Co, ізотопи Pu	8,0	2	16	Середній
Сміттєзвалища та приватний сектор	Pb, Hg, Cu, Zn, амоній, нафтопродукти, патогени	6,5	2	13	Середній
Аварійні скиди очисних споруд (мирний режим)	Патогени, БСК, амоній, завислі речовини	6,0	2	12	Середній
Транспортна інфраструктура	Нафтопродукти, мастила, метали, небезпечні вантажі	5,5	2	11	Середній
Ядерний вибух (гіпотетичний сценарій)	^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{89}Sr, ^{137m}Ba	8,0	1	8	Низький
Біологічна зброя масового ураження	Спори B. anthracis, збудники особливо небезпечних інфекцій	7,0	1	7	Низький
Хімічна зброя масового ураження	Зарин, зоман, VX, іприт, люїзит, ціаніди	5,0	1	5	Низький

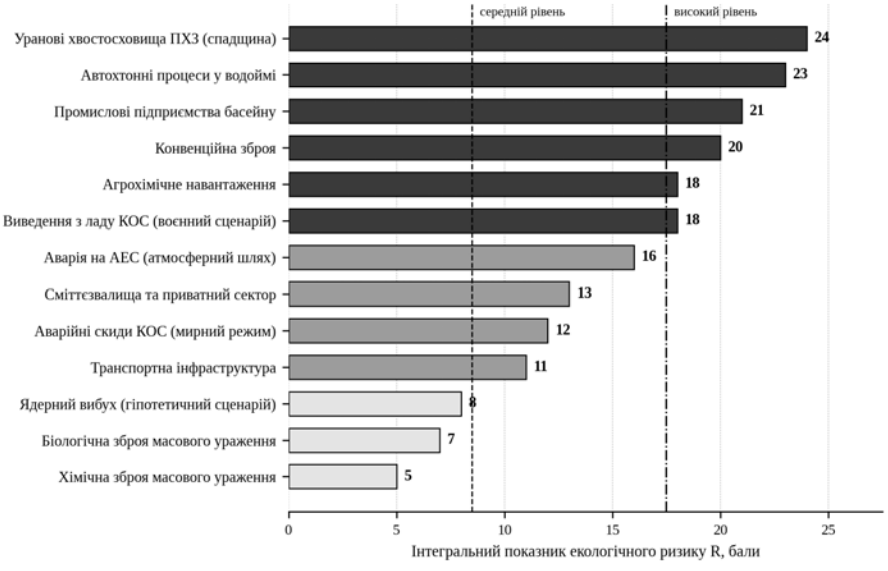

Рис. 2. Ранжування джерел ХБРЯ-навантаження за інтегральним показником екологічного ризику

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

походженням, а індустріальна спадщина середини XX століття, розташована безпосередньо в межах водозбору вище за течією. Через безперервність впливу цього чинника в поєднанні з максимальною персистентністю радіонуклідів формується найвищий інтегральний ризик. Наступними за значенням є автохтонні процеси у самій водоймі (R = 23), які за технологічним оцінюванням зазвичай взагалі не розглядаються як забруднення, оскільки вважаються природним фоном. Далі йдуть промислові скиди (R = 21) та застосування конвенційних боєприпасів (R = 20). Оцінка для конвенційної зброї заслуговує на окремий коментар. Попри те, що одиничне ураження вносить у водойму порівняно невелику масу забруднювальних речовин, систематичність обстрілів надає цьому чиннику ознак постійно діючого джерела, а основний внесок формується опосередковано – через ураження хвостосховищ, складів паливно-мастильних матеріалів, промислових цехів і каналізаційних споруд, а також через підйом донних відкладів вибуховою хвилею.

Оскільки бальна оцінка ймовірності W є найбільш суб'єктивною складовою розрахунку, виконано аналіз чутливості результату до її варіації в межах усієї шкали (табл. 5).

Аналіз чутливості дає три висновки. По-перше, дві групи джерел – хімічна зброя масового ураження та транспортна інфраструктура – не досягають високого класу ризику за жодного значення W у межах шкали. Причина в обох випадках однакова: середній індекс екологічної небезпеки характерних для них речовин становить лише 5,0 і 5,5 бала, тому навіть максимальна оцінка ймовірності дає 15 і 17 балів відповідно. Отже, їх низьке положення визначається властивостями самих речовин, а не експертною оцінкою ймовірності. По-друге, навіть за підвищення оцінки W для всіх сценаріїв застосування зброї масового ураження на один бал їх показники становитимуть 10–16 балів, що залишається нижчим за п'ять найбільш небезпечних постійно діючих джерел (18–24 бали). Отже, основний висновок роботи не змінюється за такої варіації. По-третє, всі п'ять цих джерел мають однакову оцінку W = 3, унаслідок чого їх взаємне розташування у верхній частині ранжування (рис. 2) повністю визначається індексом екологічної небезпеки, тобто екотоксикологічними властивостями речовин, а не суб'єктивною складовою розрахунку.

Отримані результати мають розглядатися як напівкількісна експертна оцінка екологічного ризику. Основні її обмеження такі. Бальні шкали складових ІЕН побудовані на узагальнених літературних характеристиках речовин, тоді як їх реальна біодоступність істотно залежить від локальних гідрохімічних умов – насамперед від pH, окисно-відновного потенціалу та вмісту органічних речовин у воді. Ці умови в розрахунку не враховано. Крім того, значна частина акваторії та водозбору недоступна для натурних досліджень, унаслідок чого оцінка спирається на довоєнні дані та на аналогії з дослідженнями суміжних ділянок Дніпровського каскаду.

Головні висновки

1. Запропоновано методичний підхід до інтегральної оцінки екологічного ризику ХБРЯ-забруднення водосховища – джерела питного водопостачання, що ґрунтується на моделі «джерело – шлях перенесення – реципієнт» і розмежовує два незалежні виміри ризику: екологічний вплив речовини, виражений індексом ІЕН = $T + B + P$, та ймовірність її надходження у водний об'єкт.

2. Виконано типізацію тринадцяти груп джерел надходження ХБРЯ-навантаження. За її результатами показано визначальне значення просторового чинника. Запорізька АЕС, розташована нижче за течією, не є для водозаборів м. Дніпро джерелом гідрологічного ризику, і її внесок може відбуватися лише через атмосферні випадання. Навпаки, уранові хвостосховища колишнього Придніпровського хімічного заводу, розташовані вище за течією за 0,8–4,4 км від русла, здатні формувати безперервно діючий канал надходження радіонуклідів.

3. Виконано ранжування двадцяти чотирьох груп речовин-індикаторів за індексом екологічної небезпеки. Згідно з ним виявлено розходження з оцінками, побудованими на критерії гострої токсичності: отруйні речовини нервово-паралітичної дії належать до категорії помірної екологічної небезпеки (5 балів) через швидкий гідроліз і відсутність біоакумуляції, тоді як кадмій і ртуть оцінюються у максимальні 9 балів.

Таблиця 5

Аналіз чутливості інтегральної оцінки до зміни бальної оцінки ймовірності надходження забруднювальних речовин

Джерело ХБРЯ-навантаження	ІЕН сер.	R при W = 1	R при W = 2	R при W = 3	Мінімальне W для високого класу
Уранові хвостосховища ПХЗ	8,0	8	16	24	3
Автохтонні процеси у водоймі	7,5	8	15	23	3
Промислові підприємства басейну	7,1	7	14	21	3
Конвенційна зброя	6,8	7	14	20	3
Агрохімічне навантаження	6,0	6	12	18	3
Виведення з ладу очисних споруд	6,0	6	12	18	3
Аварія на АЕС (атмосферний шлях)	8,0	8	16	24	3
Сміттєзвалища та приватний сектор	6,5	7	13	20	3
Аварійні скиди очисних споруд	6,0	6	12	18	3
Транспортна інфраструктура	5,5	6	11	17	Недосяжно
Ядерний вибух	8,0	8	16	24	3
Біологічна зброя масового ураження	7,0	7	14	21	3
Хімічна зброя масового ураження	5,0	5	10	15	Недосяжно

4. За інтегральною оцінкою встановлено, що найвищі рівні екологічного ризику формують не сценарії застосування зброї масового ураження (R = 5–8 балів, низький клас), а постійно діючі джерела, вплив яких посилюється воєнними чинниками: уранові хвостосховища (R = 24), автохтонні внутрішньоводоймні процеси (R = 23), промислові скиди (R = 21), конвенційна зброя (R = 20) та агрохімічне навантаження (R = 18).

5. Завдяки аналізу чутливості підтверджено правильність основного висновку. Через низький індекс екологічної небезпеки характерних речовин (5,0 і 5,5 бала) хімічна зброя масового ураження та транспортна інфраструктура не досягають високого класу ризику за жодного значення бальної оцінки ймовірності. Взаємне розташування п'яти найбільш небезпечних джерел, які мають однакову оцінку ймовірності, повністю визначається екотоксикологічними властивостями характерних для них речовин.

6. Показано, що буферна ємність водосховищ Дніпровського каскаду ефективно згладжує імпульсні надходження речовин з малою персистентністю, проте не забезпечує захисту від стійких біоакумулятивних сполук, стосовно яких вона радше перерозподіляє забруднення в часі та між компартментами.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропонований інтегральний показник екологічного ризику R може бути покладений в основу пріоритезації заходів у планах реагування на ХБРЯ-загрози та в програмах моніторингу поверхневих джерел водопостачання, оскільки дозволяє обґрунтовано розподіляти обмежені ресурси спостережної мережі між об'єктами контролю. Подальший розвиток роботи передбачається у напрямку верифікації бальних оцінок за результатами прямого відбору проб води, завісі й донних відкладів у створах питних водозаборів, переходу від експертних балів до нормованих коефіцієнтів на основі виміряних концентрацій і референтних значень, а також поширення отриманих результатів на інші водосховища Дніпровського каскаду з подальшим формуванням зведеної карти екологічного ризику всього басейну.

Конфлікт інтересів: автор Маркіна Л.М. є членом редакційної колегії журналу. Для забезпечення незалежності редакційного процесу рукопис розглядався редактором, який не мав конфлікту інтересів з автором. Автор не брав участі у відборі рецензентів, процесі рецензування та прийнятті рішення щодо публікації статті. Рукопис пройшов стандартну процедуру подвійного сліпого рецензування.

Література

1. Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A., Khilchevskyi V., De Meester L., Stepanenko S., Trokhymenko G., Hernández-Agüero J. A., Gleick P. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6, No. 5. P. 578–586. DOI: 10.1038/s41893-023-01068-x
2. Hapich H., Novitskyi R., Onopriienko D., Dent D., Roubik H. Water security consequences of the Russia-Ukraine war and the post-war outlook. *Water Security*. 2024. Vol. 21. Art. 100167. DOI: 10.1016/j.wasec.2024.100167
3. Hapich H., Novitskyi R., Onopriienko D., Dubov T. Water on fire: losses and the post-war future of ecosystem services from water resources of Ukraine. *Regional Environmental Change*. 2024. Vol. 24. Art. 154.
4. Vyshnevskyi V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Y., Gleick P. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*. 2023. Vol. 48, No. 5. P. 631–647. DOI: 10.1080/02508060.2023.2247679
5. Spears B. M., Harpham Q., Brown E., Barnett C. L., Barwell L., Roca Collell M. et al. A rapid environmental risk assessment of the Kakhovka Dam breach during the Ukraine conflict. *Nature Ecology & Evolution*. 2024. Vol. 8, No. 5. P. 834–836. DOI: 10.1038/s41559-024-02373-0
6. Stone R. Laid to waste. *Science*. 2024. Vol. 383, Iss. 6678. P. 18–23. DOI: 10.1126/science.adn7986
7. Shumilova O., Sukhodolov A., Osadcha N., Oreshchenko A., Constantinescu G., Afanasyev S. et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025. Vol. 387, Iss. 6739. P. 1181–1186. DOI: 10.1126/science.adn8655
8. Shevchuk S., Vyshnevskyi V., Bilous O. The use of remote sensing data for investigation of environmental consequences of Russia–Ukraine war. *Journal of Landscape Ecology*. 2022. Vol. 15, No. 3. P. 36–53. DOI: 10.2478/jlecol-2022-0017
9. Macklin M. G., Thomas C. J., Mudbhatkal A., Brewer P. A., Hudson-Edwards K. A., Lewin J. et al. *Impacts of metal mining on river systems: a global assessment. Science*. 2023. Vol. 381, Iss. 6664. P. 1345–1350.
10. Stanley J. K., Lotufo G. R., Biedenbach J. M., Chappell P., Gust K. A. Toxicity of the conventional energetics TNT and RDX relative to new insensitive munitions constituents DNAN and NTO in Rana pipiens tadpoles. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2015. Vol. 34, No. 4. P. 873–879. DOI: 10.1002/etc.2890
11. Srinivasan A., Viraraghavan T. Perchlorate: health effects and technologies for its removal from water resources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2009. Vol. 6, No. 4. P. 1418–1442. DOI: 10.3390/ijerph6041418
12. Perez P., Benhassine M., Quinn J., Janssens B., Van Utterbeeck F. Simulation of a nuclear fallout scenario in the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant during the Ukraine conflict: implications of dose rate distributions for downwind populations. *Military Medicine*. 2025. Vol. 190, Suppl. 2. P. 536–542. DOI: 10.1093/milmed/usaf263
13. Tsagkaris C., Laubscher L., Vladychuk V. The impacts of putting the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant in the line of fire. *Public Health Challenges*. 2022. Vol. 1, No. 4. Art. e26. DOI: 10.1002/puh2.26
14. The impact of the Russia–Ukraine war on water resources and infrastructure of Ukraine – a comprehensive review. *World*. 2025. Vol. 7, No. 1. Art. 3. DOI: 10.3390/world7010003
15. War in Ukraine: an overview of environmental impacts and consequences for human health. *Frontiers in Sustainable Resource Management*. 2024. Vol. 3. Art. 1423444. DOI: 10.3389/fsrma.2024.1423444
16. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. *Official Journal of the European Union*. 2020. L 435. P. 1–62.

Дата першого надходження статті до видання: 28.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026