

УДК 502/504

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351088

ЗАКОНОМІРНОСТІ АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

Покшевницька Т.В. аспірантка, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6606-5073>, e-mail: officentn@gmail.com

Гідротехнічні споруди є критичною інфраструктурою глобального управління водними ресурсами, проте їх експлуатація супроводжується значними екологічними наслідками, що набувають особливої актуальності в контексті зміни клімату та інтенсифікації антропогенного навантаження. Метою роботи є комплексний аналіз закономірностей антропогенного забруднення водних ресурсів гідротехнічними спорудами на основі узагальнення результатів наукових публікацій 2023-2025 років. Дослідження охоплює механізми акумуляції забруднювачів у водосховищах, масштаби седиментації та втрати накопичувальної здатності, закономірності забруднення важкими металами, вплив термічної стратифікації на якість води та сучасні стратегії мінімізації негативного впливу. Методологічною основою роботи є систематичний огляд та критичний аналіз сучасних наукових досліджень. Особлива увага приділяється регіональним відмінностям у масштабах впливу та кореляційним залежностям між характеристиками водосховищ і рівнями забруднення. Виявлено ключові закономірності антропогенного забруднення: прогресуючу седиментацію з регіональною варіативністю, що призведе до втрати 25-26% глобальної накопичувальної здатності водосховищ до 2050 року; двосторонній седиментаційний ефект з акумуляцією наносів у верхів'ї та деградацією екосистем нижче за течією; трифазну модель забруднення важкими металами з послідовною зміною стадій низького, швидкого забруднення та його контролю; парадоксальний розподіл забруднювачів із зменшенням концентрацій у водній товщі при зростанні вмісту в донних відкладах; вікову та урбанізаційну залежність накопичення важких металів; термічно-геохімічний зв'язок, що посилює евтрофікацію через внутрішню ремобілізацію фосфору та створення гіпоксичних умов. Встановлено, що концентрації кадмію можуть перевищувати фонові значення у 6-7 разів, а старіші водосховища демонструють втрату накопичувальної здатності до 50%. Наукова новизна роботи полягає у систематизації та узагальненні найсучасніших досліджень 2023-2025 років, що інтегрує знання про седиментацію, забруднення важкими металами, термічну стратифікацію та екологічні наслідки у єдиний міждисциплінарний фреймворк розуміння антропогенного впливу гідротехнічних споруд. Практична значущість дослідження полягає в обґрунтуванні необхідності впровадження комплексних стратегій управління водосховищами, що включають екологічні попуски води, технології штучної дестратифікації та програми управління седиментами для мінімізації довгострокових екологічних ризиків. Результати роботи можуть бути використані при розробці національних стратегій управління водними ресурсами, плануванні екологічного моніторингу водосховищ та оцінці екологічних наслідків будівництва нових гідротехнічних споруд. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку прогностичних моделей акумуляції забруднювачів з урахуванням кліматичних змін та створення адаптивних систем управління якістю води у водосховищах в умовах зростаючого антропогенного навантаження.

Ключові слова: гідротехнічні споруди, водосховища, антропогенне забруднення, важкі метали, седиментація, якість води, екологічні ризики.

Постановка проблеми

Гідротехнічні споруди відіграють критичну роль у глобальному управлінні водними ресурсами, забезпечуючи потреби у питній воді, зрошенні, виробництві електроенергії та контролі паводків. Станом на 2024 рік у світі налічується понад 58 000 великих гребель, які регулюють стік основних річкових басейнів планети. Однак експлуатація гідротехнічної інфраструктури супроводжується значними екологічними наслідками, що стають предметом інтенсивних наукових досліджень останніх років.

Згідно з дослідженням 2024 року, водосховища генерують понад 103 мільйони тонн надлишкового седименту щороку, що призводить до втрати накопичувальної здатності та зміни якості водних ресурсів [1]. Проблема антропогенного забруднення водних ресурсів гідротехнічними спорудами набуває особливої актуальності в контексті зміни клімату, урбанізації та інтенсифікації промислового виробництва.

Дослідження 2023-2025 років продемонстрували складні взаємозв'язки між функціонуванням гідротехнічних споруд та забрудненням водних ресурсів. Зокрема, виявлено, що будівництво гребель змінює гідрогеохімічну поведінку важких металів, посилює евтрофікацію водойм та порушує природні процеси самоочищення річкових систем [2, 3].

Особливу увагу сучасні дослідження приділяють взаємозв'язкам між зміною клімату та функціонуванням гідроенергетичної інфраструктури. Дослідження 2024 року показало, що посухи можуть погіршувати якість повітря в регіонах, які залежать від гідроенергетики, шляхом зміщення виробництва енергії на електростанції спалювання, що призводить до збільшення концентрації PM_{2,5} в середньому на 0,83 мкг/м³ та до 10 000 передчасних смертей щороку [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Наукові дослідження екологічних наслідків будівництва гідротехнічних споруд пройшли значну

еволюцію від початкового фокусу на технічних та економічних аспектах до комплексного розуміння екосистемних впливів. У перші десятиліття масового гідротехнічного будівництва (1930-1960-ті роки) переважали інженерно-технічні підходи. Перелом відбувся у 1970-1980-х роках з розвитком екологічної гідрології та усвідомленням масштабних наслідків фрагментації річкових систем. Сучасний етап (2000-ті роки - сьогодні) характеризується міждисциплінарним підходом та використанням передових методів моніторингу.

Дослідження останніх років свідчать, що греблі впливають на екосистеми через зниження річкового стоку, зменшення потоку седиментів, зміну температури води, трансформацію естуаріїв та фрагментацію середовищ проживання. Їх будівництво змінює гідрогеоморфологічні умови та зменшує латеральну зв'язність річок, що призводить до зниження продуктивності заплавлених та водно-болотних екосистем. Водночас, видалення малих гребель може призвести до відновлення річкових екосистем протягом трьох років [5, 6, 7].

Седиментація водосховищ стала предметом глобальних оцінок і перше планетарне оцінювання охопило аналіз 47 403 великих гребель у 150 країнах за результатом якого було спрогнозовано втрату 26% глобальної накопичувальної здатності до 2050 року. Аналіз змін накопичувальної здатності 256 водосховищ у США виявив, що седиментація є одним з ключових факторів зниження водозапасаєв років [8, 9].

У 2023 виявлено характерну модель забруднення важкими металами у малих та середніх водосховищах з трьома чіткими стадіями: низьке забруднення, швидке забруднення та контроль забруднення [10]. Комплексний огляд ризиків важких металів у водосховищах показав необхідність передових технологій моніторингу та екологічно чистих стратегій ремедіації [11].

Термічна стратифікація та її вплив на якість води досліджувалася у різних кліматичних зонах. Встановлено, що індекс міцності термокліну має високу кореляцію з індексом хімічної стратифікації, що підкреслює придатність цього показника для характеристики хімічної стабільності стратифікації водосховищ [12]. Глобальний огляд систем штучної дестратифікації у 138 системах та у 114 водосховищах засвідчив, що бульбашкові плюми є більш ефективними, ніж механічне змішування [13].

Аналіз літератури виявляє, що попри значний прогрес у розумінні окремих аспектів впливу гідротехнічних споруд, залишається потреба у комплексному систематизованому огляді найсучасніших досліджень 2023-2025 років, що інтегрує знання про седиментацію, забруднення важкими металами, термічну стратифікацію та екологічні наслідки для водних екосистем.

Мета статті

Дослідження спрямовано на комплексне узагальнення сучасних тенденцій антропогенного

забруднення водних екосистем, пов'язаних із функціонуванням гідротехнічних споруд, з урахуванням наукових даних 2023-2025 рр. Особливу увагу приділено процесам акумуляції забруднювачів у водосховищах, інтенсивності седиментації та втратам ємності водойм, поширенню важких металів, впливу термічної стратифікації на якість води й ефективності сучасних методів мінімізації екологічних ризиків.

Виклад основного матеріалу

Седиментація водосховищ є однією з найбільш значущих проблем сучасної гідротехнічної інфраструктури. Дослідження ООН 2023 року, що охопило понад 47 000 великих гребель у 150 країнах, виявило що до 2050 року світові водосховища втратять понад 25% своєї накопичувальної здатності через акумуляцію донних відкладів. Значними виявились регіональні відмінності у масштабах седиментації. Так, Азіатсько-Тихоокеанський регіон, найбільш «загреблена» територія світу, очікує втрат близько 23% до середини століття, що становить нижчий показник порівняно з іншими регіонами. Найбільші втрати прогнозуються для Японії, де середній вік гребель становить 100 років – країна вже втратила 39% накопичувальної здатності водосховищ, і цей показник досягне 50% до 2050 року. Після Японії, Азербайджан (24%), Ізраїль (24%) та Афганістан (20%) демонструють найвищі очікувані втрати. Проблема седиментації набуває особливої гостроти в Азії, де проживає 60% світового населення, оскільки водні запаси необхідні для забезпечення продовольчої та водної безпеки регіону. Втрата 23% накопичувальної здатності водосховищ становить значну загрозу для стійкості водних ресурсів. У контексті зміни клімату, що приносить триваліші посухи та інтенсивніші опади, максимізація можливостей зберігання води стає однією з основних проблем [14].

Греблі блокують природний рух наносів у річках, створюючи дві протилежні проблеми по обидва боки від гідротехнічної споруди. Нижче за течією від греблі природне джерело седиментів відсікається, що призводить до «голодування» річки та деградації прибережних екосистем, які потребують мулу та піску для підтримання природних місць проживання. Вище за течією седименти поступово накопичуються, оскільки не можуть ефективно проходити через греблю. Акумуляція седиментів створює множинні проблеми: вона займає простір, призначений для зберігання води; накопичується навколо гідроенергетичних установок, перешкоджаючи їх роботі; додає навантаження на греблю; робить водосховище меншим за глибиною, зменшуючи рекреаційний доступ [15]. Особливо показовим є приклад водосховища Конавінго на річці Саскуеханна (США), яке досягло 92% наповнення седиментами та втратило здатність до довгострокового затримання наносів і пов'язаних з ними поживних речовин. Згідно з дослідженням 2024 року, водосховище Конавінго затримувало в середньому 3,5 мільйони фунтів фосфору та чотири мільярди

фунтів седиментів щороку з моменту відкриття в 1928 році, що становило приблизно третину фосфору та половину седиментів, які надходять річкою до Чесапекської затоки. Однак після досягнення 92% заповнення у 2015 році, водосховище затримує менші обсяги седиментів, а під час великих штормів мул та пов'язані поживні речовини виносяться через греблю у затоку із значно більшою частотою [16].

Найбільш значущою проблемою седиментації є втрата накопичувальної здатності для водопостачання чи контролю паводків. У контексті зміни клімату, що приносить триваліші посухи та більші шторми, максимізація можливостей зберігання води стає ще більш критичною та додається до переліку проблем водного розвитку, з якими світ вже стикається та не взмозі вирішити [14].

Будівництво гребель істотно впливає на геохімічну поведінку важких металів у річкових системах. Дослідження водосховища «Три ущелини» у Китаї протягом 2008-2020 років продемонструвало, що рівні важких металів (окрім Cr) значно перевищували фонові значення ґрунтів, причому Cu, Zn, As, Cd, Pb та Hg відповідали помірно та високо забрудненим класам. Концентрації кадмію виявились у 6-7 разів вищими за фонові значення ґрунтів. Після повного наповнення водосховища у 2008-2014 роках спостерігалось очевидне збільшення більшості важких металів (окрім Ni та As), що підтверджує роль будівництва водосховища у посиленні ефектів сорбції седиментами важких металів. Просторові закономірності розподілу металів значною мірою залежали від точок відбору проб, що свідчить про те, що інтенсивна антропогенна діяльність є основним джерелом забруднення. Рівні більшості

важких металів (окрім Cd та Hg) перевищували порогову концентрацію ефекту (ТЕС), що вказує на ризики негативних впливів, тоді як всі важкі метали були нижчими за ймовірну концентрацію ефекту (РЕС) [2]. Дослідження 2022 року виявило парадоксальний ефект будівництва гребель на якість води: концентрації важких металів у основному руслі води водосховища «Три ущелини» зменшилися після затоплення, тоді як їх концентрації та забруднення в седиментах зони коливання рівня води значно зросли, особливо для металів антропогенного походження, таких як кадмій, свинець та цинк [17].

Дослідження польських водосховищ 2023 року підтверджує глобальний характер проблеми. Середні концентрації важких металів у донних відкладах 28 водосховищ становили: Cd < Ni < Cr < Cu < Pb < Zn (0,187; 7,30; 7,74; 10,62; 12,47 та 52,67 мг/дм³ відповідно). Індекс навантаження забруднення варіював від 0,05 до 2,45, вказуючи на забруднення донних відкладів у семи водосховищах. Аналіз показав, що концентрації Pb, Zn та Cd є вищими у старіших водосховищах та тих, які мають більшу частку штучних територій у їх водозборах [18].

Дослідження італійських водосховищ Камастра та Сан-Джуліано у 2024 року виявило, що хоча седименти не характеризуються значним забрудненням важкими металами (більшість показників індексів коливалися між 0 та 1 – «незабруднені»), у деяких випадках значення були між 1 та 2 («слабко забруднені») [19].

Узагальнення результатів досліджень різних водосховищ світу дозволяє виявити характерну трифазну модель динаміки забруднення донних відкладів важкими металами (рис. 1).

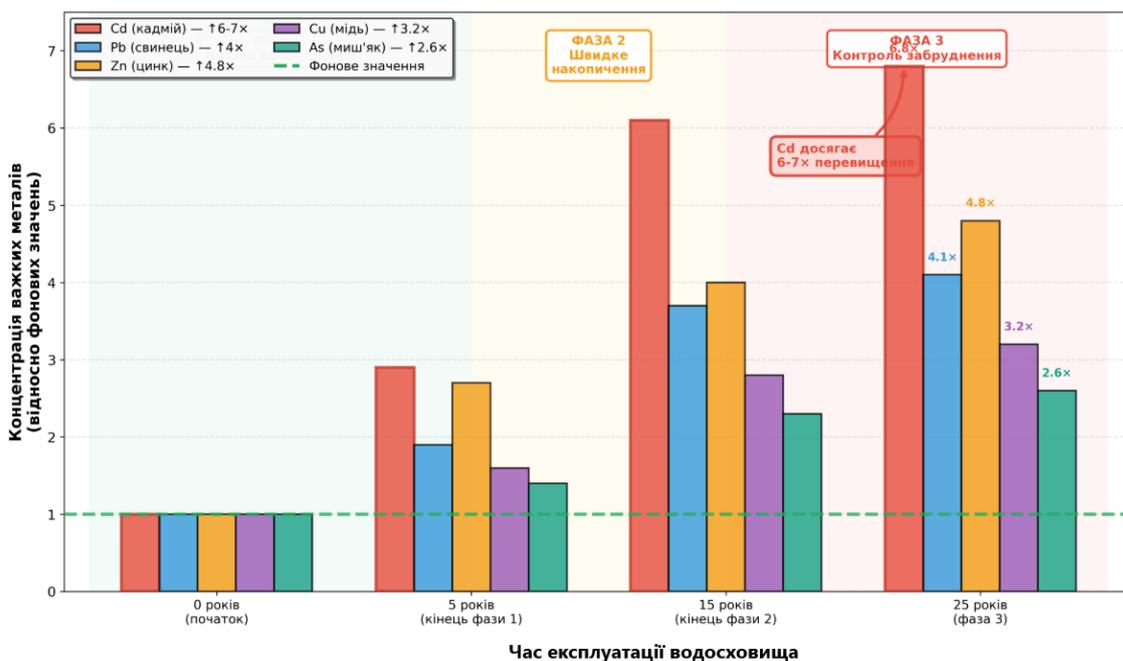


Рис. 1 – Трифазна модель динаміки забруднення донних відкладів водосховищ важкими металами

Перша фаза (0-5 років експлуатації) характеризується низьким рівнем забруднення, коли концентрації важких металів наближаються до фонових значень. Друга фаза (5-15 років) демонструє швидке накопичення металів у донних відкладах, при цьому найбільш інтенсивно акумулюються метали антропогенного походження, зокрема кадмій, концентрація якого може зростати у 6-7 разів відносно фонових значень. Третя фаза (15+ років) характеризується уповільненням темпів накопичення та стабілізацією концентрацій на рівні контролю забруднення (рис. 1).

Особливу увагу привертає катастрофічний випадок руйнування дамби Каховської гідроелектростанції у червні 2023 року, яке експонувало до 1,7 км³ забруднених седиментів. Дослідники оцінюють, що ці седименти містять до 83 300 тонн високотоксичних важких металів, які описуються як «токсична бомба уповільненої дії». Станом на 2024 рік, менше 1% забруднення було вивільнено в прилеглі території, переважно з верхів'я греблі, однак поверхневий стік під час дощів та сезонні паводки продовжують мобілізувати забруднювачі [20].

Дослідження, присвячене 54 найбільшим низькоширотним водосховищам, виявило, що два фундаментальні фізичні процеси визначають більшість змін якості води: затримування седиментів та поживних речовин, а також термічна стратифікація у водосховищах. Глибина, на яку відбувається перемішування (часто 50 м і більше) під час дестратифікації, є продуктом м'якого градієнта термічної густини між поверхневою та глибокою водою, що забезпечує більше можливостей для транспортування глибокого фосфору назад на поверхню. Термічно стратифіковані низькоширотні водосховища мають високий ризик виникнення проблем евтрофікації через внутрішню ремобілізацію фосфору. Іншим екологічним стресором, який накладається гіпоксичною водою водосховища, є висока концентрація відновлених сполук, таких як сірководень (H₂S) та відновлене залізо, які обмежують біологічну доступність поживних речовин та створюють токсичні умови для водної біоти [21].

Найбільш розроблений та впроваджений підхід (або сукупність підходів) для пом'якшення впливів гребель – це екологічні попуски (eflows), які прагнуть коригувати скиди з дамб для імітації природних гідрологічних патернів. Хоча підхід екологічних попусків традиційно зосереджувався на пом'якшенні екологічних проблем, що впливають з порушених гідрологічних режимів, зростає усвідомлення того, що якість води (змінні, такі як температура води, забруднювачі, поживні речовини, органічна речовина, седименти, розчинений кисень) повинна бути інкорпорована у фреймворк.

Дослідження 2024 року підкреслює зростаючу проблему азотного забруднення водних ресурсів. Прогнозується, що до 2050 року загальні надходження розчиненого азоту (TDN) до річок становитимуть 112-147 кілотонн/рік серед трьох сценаріїв, що відповідає

збільшенню на 6-39% порівняно з 2010 роком. У найгіршому сценарії (SSP5-RCP8.5) це збільшення можна пояснити зростанням антропогенних джерел, таких як побутові відходи та синтетичні добрива. У цьому сценарії прогнозується, що стічні води стануть домінуючим джерелом азотного забруднення річок, в основному через діяльність, пов'язану з швидкою урбанізацією, та недостатні технології очищення стічних вод та інфраструктуру. Дослідження виявило, що азотне забруднення посилює дефіцит води у понад 2000 суббасейнах, таким чином більше 3 мільярди людей зіткнуться з серйозним дефіцитом води вже у 2050 році [22].

Дослідження останніх років показало, що з 1950-х років антропогенна діяльність (надмірний вилов риби, забруднення води, будівництво гідротехнічних споруд, судноплавство та розвиток берегової лінії, інвазивні чужорідні види тощо) значною мірою змінюють гідрологічні та екологічні умови річок, що призводить до різкої втрати біорізноманіття. Блокування річкових та озерних водних систем створює негативний каскадний ефект на екосистеми [2].

Найбільш розроблений підхід для мінімізації впливів гребель – це екологічні попуски води (environmental flows), які прагнуть коригувати скиди з дамб для імітації природних гідрологічних патернів. Підхід екологічних попусків до управління водосховищем може впроваджувати симульований паводковий період шляхом вивільнення деяких запасів води водосховища протягом відповідного сезону. Хоча підхід екологічних попусків традиційно зосереджувався на пом'якшенні екологічних проблем, що впливають з порушених гідрологічних режимів, зростає усвідомлення того, що якість води (змінні, такі як температура води, забруднювачі, поживні речовини, органічна речовина, седименти, розчинений кисень) повинна бути інкорпорована у фреймворк [21].

На основі аналізу сучасних наукових публікацій 2023-2025 років виявлено наступні ключові закономірності антропогенного забруднення водних ресурсів гідротехнічними спорудами:

1. Прогресуюча седиментація з регіональною варіативністю: глобальні водосховища демонструють втрату накопичувальної здатності зі швидкістю, що призведе до скорочення на 25-26% до 2050 року, при цьому найбільші втрати спостерігаються у регіонах з тривалим терміном експлуатації гідротехнічних споруд (Японія – 39-50%, Азербайджан та Ізраїль – по 24%).

2. Двосторонній седиментаційний ефект: греблі створюють протилежні проблеми по обидва боки споруди – акумуляцію седиментів у верхів'ї водосховища (що призводить до втрати накопичувальної здатності) та «голодування» річки нижче за течією (деградація прибережних екосистем через відсікання природного джерела наносів).

3. Часова динаміка забруднення важкими металами: у малих та середніх водосховищах виявлено

характерну трифазну модель – низьке забруднення (початкова стадія), швидке забруднення (період активного накопичення) та контроль забруднення (стабілізація). Концентрації важких металів у седиментах систематично зростають після повного наповнення водосховищ, особливо для металів антропогенного походження (Cd, Pb, Zn).

4. Парадоксальний розподіл забруднювачів: будівництво гребель призводить до зменшення концентрацій важких металів у водній товщі при одночасному значному зростанні їх вмісту в донних відкладах, особливо в зоні коливання рівня води, що створює латентні екологічні ризики.

5. Вікова та урбанізаційна залежність: концентрації важких металів (Pb, Zn, Cd) у донних відкладах корелюють з віком водосховища та часткою штучних територій у водозборі, що підтверджує кумулятивний характер антропогенного навантаження.

6. Термічно-геохімічний зв'язок: у низькоширотних водосховищах термічна стратифікація посилює евтрофікацію через внутрішню ремобілізацію фосфору та створення гіпоксичних умов з високими концентраціями токсичних відновлених сполук (H_2S , Fe^{2+}), що обмежує біологічну доступність поживних речовин.

7. Прогресуюче азотне забруднення: прогнозується зростання надходження розчиненого азоту до річок на 6-39% до 2050 року, при цьому стічні води стануть домінуючим джерелом забруднення через урбанізацію та недостатність технологій очищення.

Виявлені закономірності підтверджують системний характер антропогенного впливу гідротехнічних споруд на водні ресурси та вказують на необхідність впровадження комплексних стратегій управління, що інтегрують екологічні попуски води, технології штучної дестратифікації та програми управління седиментами для мінімізації довгострокових екологічних ризиків.

Висновки

Аналіз наукових публікацій 2023-2025 років виявив критичні закономірності антропогенного забруднення водних ресурсів гідротехнічними спорудами, що проявляються у трьох взаємопов'язаних процесах: прогресуючій седиментації з втратою чверті глобальної накопичувальної здатності водосховищ до 2050 року, трифазній динаміці накопичення важких металів з перевищенням фонових концентрацій у 6-7 разів, та термічній стратифікації, що посилює евтрофікацію і створює гіпоксичні умови.

Встановлено, що масштаби забруднення визначаються віком водосховища, рівнем урбанізації водозбору та особливостями термогідродинамічного режиму. Виявлений парадоксальний ефект розподілу забруднювачів – зменшення концентрацій у воді при зростанні вмісту в донних відкладах – створює довгострокові екологічні ризики для водних екосистем.

Результати дослідження обґрунтовують необхідність переходу від традиційних підходів до комплексного управління водосховищами, що інтегрує екологічні попуски води, штучну дестратифікацію та контроль седиментації. Практичне застосування виявлених закономірностей дозволить підвищити ефективність екологічного моніторингу та мінімізувати негативний вплив гідротехнічних споруд на якість водних ресурсів.

Перелік використаних джерел

- [1] Ndayiragije J. M., Nkuzimana A. Socio-environmental impacts of hydropower construction in Burundi. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, no. 21. Article e39084. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40084>.
- [2] Progress and future of China's aquatic ecological environment protection / J. Wang et al. *River*. 2024. Vol. 1, no. 2. Pp. 87-102. DOI: <https://doi.org/10.1002/rvr.2.87>.
- [3] Xu Q., Zhou K., Wu B. Dam construction reshapes heavy metal pollution in soil/sediment in the three gorges reservoir, China, from 2008 to 2020. *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. Article 1269138. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1269138>.
- [4] Eriksson M., del Valle A., de la Fuente A. Droughts worsen air quality and health by shifting power generation. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. Article 60090-z. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60090-z>.
- [5] Review of Effects of Dam Construction on the Ecosystems of River Estuary and Nearby Marine Areas / X. Zhang et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 10. Article 5974. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14105974>.
- [6] River Damming Impacts on Fish Habitat and Associated Conservation Measures / Q. Chen et al. *Reviews of Geophysics*. 2023. Vol. 61. Article e2023RG000819. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023RG000819>.
- [7] Aquatic habitat response to small dam removal demonstrates recovery in three years / J. Dietrich et al. *Ecosphere*. 2025. Vol. 16. Article e70323. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.70323>.
- [8] Perera D., Williams S., Smakhtin V. Present and Future Losses of Storage in Large Reservoirs Due to Sedimentation: A Country-Wise Global Assessment». *Sustainability*. 2022. Vol. 15, no. 1. Article 219. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010219>.
- [9] Chen Y., Cai X. The Storage and Operation Changes of 256 Reservoirs Across the Contiguous United States. *Water Resources Research*. 2025. Vol. 61. Article e2024WR037372. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024WR037372>.
- [10] Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China / H. Bing et al. *Environmental Pollution*. 2016.

- Vol. 214. Pp. 485-496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.062>.
- [11] Heavy metals in reservoirs: pollution characteristics, remediation technologies, and future prospects / S. Cui et al. *Agricultural Ecology and Environment*. 2025. Vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.48130/ae-0025-0003>.
- [12] A case study of thermal and chemical stratification in a drinking water reservoir / Shi J., Wang L., Yang Y., Huang T. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 848. Article 157787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157787>.
- [13] Artificial destratification options for reservoir management / F. Chaaya et al. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 967. Article 178738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178738>.
- [14] Doyle E. The World's Dams Are Filling Up – But Not With Water. 2023. URL: <https://therevelator.org/dams-sedimentation-study/> (дата звернення: 15.10.2024).
- [15] A dwindling water supply caused by reservoir sedimentation troubles engineers. American Society of Civil Engineers. 2024. URL: <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues/magazine-issue/article/2024/03/a-dwindling-water-supply-caused-by-reservoir-sedimentation-troubles-engineers> (дата звернення: 25.11.2024).
- [16] Conowingo Dam. Chesapeake Bay Program. Chesapeake Bay Foundation. 2024. URL: <https://www.chesapeakebay.net/issues/threats-to-the-bay/conowingo-dam> (дата звернення: 25.11.2024).
- [17] Dam construction attenuates trace metal contamination in water through increased sedimentation in the Three Gorges Reservoir / H. Bing et al. *Water Research*. 2022. Vol. 217. Article 118417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118419>.
- [18] Ecological and Health Risk Assessments of Heavy Metals Contained in Sediments of Polish Dam Reservoirs / Sojka M., Ptak M., Jaskuła J., Krasniqi V. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20, no. 1. Article 324. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20010324>.
- [19] A Relevant Characterization and Compatibility for Reuse the Sediments from Reservoirs in Southern Italy / A. M. N. Martellotta et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 2. Article 727. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14020727>.
- [20] Kakhovka dam attack exposed 'toxic time bomb' of heavy metal pollution. Chemistry World. 2024. URL: <https://www.chemistryworld.com/news/kakhovka-dam-attack-exposed-toxic-time-bomb-of-heavy-metal-pollution/4021155.article> (дата звернення: 12.11.2024).
- [21] Enhancing water security through integrated decision-making and selective withdrawal for sustainable reservoir management / F. Alizadeh et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 32214. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18027-5>.
- [22] A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution / M. Wang et al. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. Article 880. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>.

REGULARITIES OF ANTHROPOGENIC POLLUTION OF WATER RESOURCES

Pokshevnytska T.V. PhD student, National transport University, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6606-5073>, e-mail: officentn@gmail.com

Hydrotechnical structures are critical infrastructure for global water resources management, yet their operation is accompanied by significant environmental consequences that become particularly relevant in the context of climate change and intensification of anthropogenic pressure. The aim of this work is a comprehensive analysis of patterns of anthropogenic pollution of water resources by hydrotechnical structures based on the synthesis of scientific publications from 2023-2025. The study covers mechanisms of pollutant accumulation in reservoirs, scales of sedimentation and loss of storage capacity, patterns of heavy metal pollution, the impact of thermal stratification on water quality, and modern strategies for minimizing negative impacts. The methodological basis of the work is a systematic review and critical analysis of contemporary scientific research. Particular attention is paid to regional differences in the scale of impact and correlational dependencies between reservoir characteristics and pollution levels. Key patterns of anthropogenic pollution have been identified: progressive sedimentation with regional variability, which will lead to a loss of 25-26% of global reservoir storage capacity by 2050; a two-sided sedimentation effect with sediment accumulation in the upper reaches and ecosystem degradation downstream; a three-phase model of heavy metal pollution with sequential stages of low pollution, rapid pollution, and pollution control; a paradoxical distribution of pollutants with decreasing concentrations in the water column while increasing content in bottom sediments; age-dependent and urbanization-dependent accumulation of heavy metals; a thermal-geochemical relationship that intensifies eutrophication through internal phosphorus remobilization and creation of hypoxic conditions. It has been established that cadmium concentrations can exceed background values by 6-7 times, and older reservoirs demonstrate a loss of storage capacity up to 50%. The scientific novelty of the work lies in the systematization and generalization of the most recent research from 2023-2025, which

integrates knowledge about sedimentation, heavy metal pollution, thermal stratification, and ecological consequences into a unified interdisciplinary framework for understanding the anthropogenic impact of hydrotechnical structures. The practical significance of the study lies in substantiating the need to implement comprehensive reservoir management strategies that include environmental water releases, artificial destratification technologies, and sediment management programs to minimize long-term environmental risks. The results of the work can be used in developing national water resources management strategies, planning environmental monitoring of reservoirs, and assessing the environmental impacts of new hydrotechnical structure construction. Further research should be directed toward developing predictive models of pollutant accumulation considering climate change and creating adaptive water quality management systems in reservoirs under conditions of increasing anthropogenic pressure.

Keywords: hydrotechnical structures, reservoirs, anthropogenic pollution, heavy metals, sedimentation, water quality, environmental risks.

References

- [1] J.M. Ndayiragije, and A. Nkuzimana, "Socio-environmental impacts of hydropower construction in Burundi," *Heliyon*, vol. 10, no. 21, article e39084, 2024. doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e40084](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40084).
- [2] J. Wang et al., "Progress and future of China's aquatic ecological environment protection," *River*, vol. 1, no. 2, pp. 87-102, 2024. doi: [10.1002/rvr.2.87](https://doi.org/10.1002/rvr.2.87).
- [3] Q. Xu, K. Zhou, and B. Wu, "Dam construction reshapes heavy metal pollution in soil/sediment in the three gorges reservoir, China, from 2008 to 2020," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 11, article 1269138, 2023. doi: [10.3389/fenvs.2023.1269138](https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1269138).
- [4] M. Eriksson, A. del Valle, and A. de la Fuente, "Droughts worsen air quality and health by shifting power generation," *Nature Communications*, vol. 16, article 60090-z, 2025. doi: [10.1038/s41467-025-60090-z](https://doi.org/10.1038/s41467-025-60090-z).
- [5] X. Zhang, C. Fang, Y. Wang, X. Lou, Y. Su, and D. Huang, "Review of Effects of Dam Construction on the Ecosystems of River Estuary and Nearby Marine Areas," *Sustainability*, vol. 14, no. 10, article 5974, 2022. doi: [10.3390/su14105974](https://doi.org/10.3390/su14105974).
- [6] Q. Chen et al., "Fleischmann A.S., Yan H. and Tang L. River Damming Impacts on Fish Habitat and Associated Conservation Measures," *Reviews of Geo-physics*, vol. 61, article e2023RG000819, 2023. doi: [10.1029/2023RG000819](https://doi.org/10.1029/2023RG000819).
- [7] J. Dietrich, A. Rickard, S.A. Sethi, S. Cuppett, and P. Sullivan, "Aquatic habitat response to small dam removal demonstrates recovery in three years," *Ecosphere*, vol. 16, article e70323, 2025. doi: [10.1002/ecs2.70323](https://doi.org/10.1002/ecs2.70323).
- [8] D. Perera, S. Williams, and V. Smakhtin, "Present and Future Losses of Storage in Large Reservoirs Due to Sedimentation: A Country-Wise Global Assessment," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, article 219, 2022. doi: [10.3390/su15010219](https://doi.org/10.3390/su15010219).
- [9] Y. Chen, and X. Cai, "The Storage and Operation Changes of 256 Reservoirs Across the Contiguous United States," *Water Resources Research*, vol. 61, article e2024WR037372, 2025. doi: [10.1029/2024WR037372](https://doi.org/10.1029/2024WR037372).
- [10] H. Bing, J. Zhou, Y. Wu, X. Wang, H. Sun, and R. Li, "Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China," *Environmental Pollution*, vol. 214, pp. 485-496, 2016. doi: [10.1016/j.envpol.2016.04.062](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.062).
- [11] S. Cui et al., "Heavy metals in reservoirs: pollution characteristics, remediation technologies, and future prospects," *Agricultural Ecology and Environment*, vol. 3, 2025. doi: [10.48130/aec-0025-0003](https://doi.org/10.48130/aec-0025-0003).
- [12] J. Shi, L. Wang, Y. Yang, and T. Huang, "A case study of thermal and chemical stratification in a drinking water reservoir," *Science of the Total Environment*, vol. 848, article 157787, 2022. doi: [10.1016/j.scitotenv.2022.157787](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157787).
- [13] F. Chaaya, B. Miller, M. Gordos, B. Tamburic, and S. Felder, "Artificial destratification options for reservoir management," *Science of the Total Environment*, vol. 967, article 178738, 2025. doi: [10.1016/j.scitotenv.2025.178738](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178738).
- [14] Doyle E. The Worlds Dams Are Filling Up – But Not With Water. 2023. [Online]. Available: <https://therevelator.org/dams-sedimentation-study/>. Accessed on: Oct. 15, 2024.
- [15] A dwindling water supply caused by reservoir sedimentation troubles engineers. American Society of Civil Engineers. 2024. [Online]. Available: <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues/magazine-issue/article/2024/03/a-dwindling-water-supply-caused-by-reservoir-sedimentation-troubles-engineers>. Accessed on: Nov. 25, 2024.
- [16] Conowingo Dam. Chesapeake Bay Program. Chesapeake Bay Foundation. 2024. [Online]. Available: <https://www.chesapeakebay.net/issues/threats-to-the-bay/conowingo-dam>. Accessed on: Nov. 25, 2024.
- [17] H. Bing, Y. Liu, J. Huang, X. Tian, H. Zhu, and Y. Wu, "Dam construction attenuates trace metal contamination in water through increased sedimentation in the Three Gorges Reservoir," *Water Research*, vol. 217, article 118417, 2022. doi: [10.1016/j.watres.2022.118419](https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118419).
- [18] M. Sojka, M. Ptak, J. Jaskuła, and V. Krasniqi, "Ecological and Health Risk Assessments of Heavy Metals Contained in Sediments of Polish Dam Reservoirs," *International Journal of Environmental Research and*

- Public Health*, vol. 20, no. 1, article 324, 2023. doi: **10.3390/ijerph20010324**.
- [19] A.M.N. Martellotta, D. Levacher, F. Gentile, G. Rani-eri, T. Trabace, and A.F. Piccinni, "A Relevant Char-acterization and Compatibility for Reuse the Sedi-ments from Reservoirs in Southern Italy," *Applied Sci-ences*, vol. 14, no. 2, article 727, 2024. doi: **10.3390/app14020727**.
- [20] Kakhovka dam attack exposed toxic time bomb of heavy metal pollution. Chemistry World. 2024. [Online]. Available: <https://www.chemistryworld.com/news/kakhovka-dam-attack-exposed-toxic-time-bomb-of-heavy-metal-pollution/4021155.article>. Accessed on: Nov. 25, 2024.
- [21] F. Alizadeh, M.H. Niksokhan, M.R. Nikoo, A. Mishra, M. Al-Wardy, and G. Al-Rawas, "Enhancing water se-curity through integrated decision-making and selec-tive withdrawal for sustainable reservoir manage-ment," *Scientific Reports*, vol. 15, article 32214, 2025. doi: **10.1038/s41598-025-18027-5**.
- [22] M. Wang et al., "A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution," *Nature Communications*, vol. 15, article 880, 2024. doi: **10.1038/s41467-024-44947-3**.

Стаття надійшла 14.11.2025

Стаття прийнята 02.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Покшевніцька Т. В. Закономірності антропогенного забруднення водних ресурсів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 166-173. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351088>.