

¹А. Ю. КОРНІЄНКО, ¹В. В. ГРУБІНКО, ¹Г. В. ЧВАЛЮК, ²І. В. КАЛІНІН¹Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка

вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027

²Національний університет біоресурсів та природокористування

вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041

e-mail: arkorniienko@gmail.com

МІКРО- ТА РІДКОЗЕМЕЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ У ВОДІ ТА ВОДНИХ ОРГАНІЗМАХ ПРІСНОВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

У цій оглядовій статті представлено всебічний аналіз ролі мікро- та рідкоземельних елементів (РЗЕ) у прісноводних екосистемах з акцентом на їхні джерела, біологічне значення, закономірності накопичення та потенційні екологічні ризики. Огляд узагальнює сучасні дослідження щодо участі цих елементів у біохімічних процесах, вплив на біорізноманіття, а також внесок у стабільність екосистем та процеси евтрофікації водних середовищ. Розглянуто біоаккумуляцію елементів у водних організмах, описано фактори, що впливають на їхнє засвоєння, накопичення та просування по трофічних ланцюгах. Також проаналізовано ризики, пов'язані з надмірними концентраціями елементів, які можуть спричиняти токсичні ефекти, оксидативний стрес і фізіологічні порушення метаболізму водних організмів.

Значну увагу приділено рідкоземельним елементам. Розкрито їхню потенційну роль у біологічних процесах, взаємодію з іншими хімічними елементами та вплив на клітинний метаболізм.

Огляд також включає аналіз механізмів забруднення РЗЕ, їхньої міграції у водних системах і можливих довготривалих екологічних наслідків.

Додатково розглянуто біогеохімічні цикли мікро- та рідкоземельних елементів, включаючи фактори, що впливають на їхню біодоступність і токсичність, зокрема рН, окисно-відновні умови та взаємодію з органічною речовиною. Визначено важливість моніторингу вмісту цих елементів у водних екосистемах як складової частини природоохоронних заходів.

Ключові слова: мікроелементи, рідкоземельні елементи, прісноводні екосистеми, біоаккумуляція, токсичність, евтрофікація, антропогенний вплив.

Мікроелементи (МЕ) є важливими компонентами прісноводних екосистем, оскільки вони впливають на фізіологічні та біохімічні процеси водних організмів, забезпечують необхідні умови для їх життя, зокрема водоростей, та впливають на загальний стан водних біоценозів. До основних мікроелементів, що трапляються у прісноводних водоймах, належать: Залізо (Fe), Мідь (Cu), Цинк (Zn), Марганець (Mn), Молібден (Mo), Кобальт (Co), Бор (B), Нікель (Ni), Йод (I), Флуор (F) [11]. Вони є необхідними для життєдіяльності водних організмів, оскільки входять до складу ферментів, беруть участь у забезпеченні метаболічних процесів. Проте надлишок цих елементів у водному середовищі може спричинити його токсичність, що негативно впливає як на окремі організми, так і на цілі прісноводні екосистеми загалом [16].

Джерелами надходження мікроелементів у водне середовище можуть бути як природні шляхи, так і антропогенна діяльність.

Видом антропогенної активності є господарська діяльність людини, а саме: побутові стоки міст, змиви із земельних угідь після агро- та фітообробки [12]. Таким чином до гідроекосистем можуть надходити такі речовини та сполуки, як: оксиди сірки, азоту, фосфору, вуглецю, свинець, органічні речовини (гумінові компоненти, рештки відмерлих організмів рослин та тварин, нафтопродукти), сполуки важких металів.

До наслідків непрямого впливу людини можна віднести поверхневий стік з берегів, коли відбувається вимивання неорганічних солей (сульфатів, хлоридів, карбонатів кальцію, магнію, свинцю, кадмію). Таким же чином до водойм потрапляють й органічні сполуки.

До природних джерел мікроелементів у гідроекосистемах належать геохімічні процеси, вивітрювання гірських порід, атмосферні опади, а також внесення мінералів через стік із

лісових, лугових і болотних екосистем. В атмосферних опадах накопичуються забруднюючі речовини внаслідок викидів відходів промислових підприємств, транспорту та міських котелень. Дощі, сніг і туман можуть переносити мікроелементи з повітря у складі пилу, солей та інших частинок. Після вивітрювання мінералів у ґрунтах мікроелементи, які потрапили у воду, можуть існувати у формі розчинних іонів або бути зв'язаними з частинками осаду. Їх біодоступність залежить від хімічної форми, рН води та інших фізико-хімічних умов [29]. Наприклад, оксиди металів та інші аерозолі, що утворюються у результаті ерозії ґрунту, осідають разом з атмосферними опадами [16], весняне танення снігу сприяє розмиванню ґрунту і надходженню забруднень у водойми та турбулентне перемішування води.

Особливу роль у контамінації гідроекосистеми відіграє міграція мікроелементів із донних відкладів. У процесі біохімічного розкладу органічних речовин або під впливом зміни параметрів водного середовища (наприклад, кислотності чи вмісту кисню) мікроелементи можуть переходити з донних осадів у розчинену форму, впливаючи на склад води.

Вони відіграють ключову роль у біохімічних процесах прісноводних організмів, забезпечуючи їх нормальний розвиток, метаболізм та адаптацію до умов довкілля, підтримки імунної системи. МЕ є незамінними компонентами ферментів, коферментів, гормонів та структурних білків, що дозволяє підтримувати функціонування клітинних систем [9].

Вміст мікроелементів у флорі прісноводних екосистем впливає на зростання і розвиток мікродоростей, що є первинними продуцентами в екосистемах, забезпечуючи кисень і органічні речовини для інших організмів, а також здійснюють фотосинтетичні процеси, зокрема для синтезу хлорофілу та активації ферментів, які регулюють вуглецевий і азотний обміни. Наприклад, Залізо (Fe) є основним компонентом ферментів, таких як ферредоксин, що беруть участь у фотосинтезі, ефективність якого знижується за нестачі цього МЕ та може призводити до зменшення продуктивності та порушень росту (особливо в оліготрофних водоймах), зниження стійкості до стресових факторів та хвороб водної рослинності [3, 8]. Тоді як його надлишок може сприяти розмноженню шкідливих видів водоростей або «цвітінню» води.

Ключовим компонентом прісноводних екосистем є фітопланктон, який виконує фундаментальну роль у підтримці біологічної рівноваги, стабільності прісноводних екосистем та слугує індикатором їхнього екологічного стану [7].

Надлишкове накопичення мікроелементів у водоростях може також виступати індикатором екологічного стану водойми. Завдяки своїй здатності швидко реагувати на зміни у середовищі, вони є важливим об'єктом для моніторингу забруднення води. Високі концентрації токсичних елементів можуть пригнічувати розвиток корисних видів і сприяти розмноженню патогенних або шкідливих водоростей [29]. Наприклад, підвищення рівня Цинку (Zn) та Молібдену (Mo) може стимулювати ріст деяких видів водоростей, що водночас може призвести до зменшення біорізноманіття рослин та риб.

Ефективне управління водними ресурсами включає регулярний моніторинг мікроелементів у водоймах. Використання сучасних аналітичних методів, таких як спектроскопія, дозволяє точно визначати концентрації елементів і виявляти потенційні ризики для екосистеми. Це важливо для збереження біорізноманіття і підтримки «здорових» водних екосистем [29].

Не менш важливим є вплив мікроелементів і на іхтіофауну, зокрема одним із найважливіших є залізо (Fe), яке входить до складу гемоглобіну, міоглобіну та цитохромів. Його сполуки беруть участь у транспортуванні кисню, диханні клітин і процесах енергозабезпечення [17].

Цинк (Zn) регулює активність численних металоферментів, зокрема карбоангідрази, яка важлива для підтримання кислотно-лужного балансу в організмах. Він також сприяє синтезу ДНК, білків та регулює ріст водної рослинності, що впливає на якість водного середовища [24]. Мідь (Cu) необхідна для функціонування багатьох ферментів, зокрема тих, що беруть участь у процесах фотосинтезу та азотного обміну, виступає в ролі кофактора в окисно-відновних реакціях. Вона бере участь у синтезі меланіну, функціонуванні дихального ланцюга, а також

сприяє імунній відповіді у водних тварин. Проте її надлишок може викликати токсичні ефекти, пригнічуючи активність фітопланктону [1], та порушувати дихальні функції риб і моллюсків.

Марганець (Mn) є важливим елементом у метаболізмі вуглеводів та ліпідів. У рослин він входить до складу фотосинтетичного комплексу, відповідального за розщеплення води в процесі фотосинтезу, а також активує ферменти, що регулюють антиоксидантний захист [30]. Марганець (Mn) та Молібден (Mo) важливі для обміну азотом, зокрема, для синтезу амінокислот і нуклеїнових кислот.

Селен (Se) діє як потужний антиоксидант завдяки своїй участі в утворенні глутатіонпероксидази, яка захищає клітини від оксидативного стресу. У водних організмів він забезпечує захист мембран клітин від ушкоджень та підтримує імунітет [17].

Крім того, важливим є вплив Кобальту (Co), який входить до складу вітаміну B12, необхідного для нормального функціонування багатьох водних організмів. Відомо, що дефіцит Кобальту (Co) може призводити до порушень метаболізму та, як наслідок, до зниження популяцій певних видів риб і безхребетних. Водночас антропогенні джерела, такі як стічні води та промислові відходи, збільшують концентрацію цього мікроелемента до токсичних рівнів, що може мати негативні наслідки для біорізноманіття водойм [4].

Мікроелементи мають властивість до біоаккумуляції – накопичення в організмах прісноводних водойм, що є наслідком їх надходження, накопичення та перерозподілу у тканинах та органах гідробіонтів. Це один з найбільш важливих аспектів існування водних організмів, оскільки тривала біоаккумуляція може призвести до інтоксикації. Процес залежить від низки чинників, зокрема фізико-хімічних властивостей водного середовища, біологічних особливостей організмів, трофічного рівня та способу живлення [1].

Мікроелементи надходять до водних організмів переважно двома шляхами: безпосередньо з води через зябра та покриви або опосередковано через харчовий ланцюг. Різні види мають специфічні механізми накопичення, які визначаються їхніми фізіологічними особливостями. Наприклад, бентосні безхребетні, такі як моллюски та кільчасті черви, поглинають мікроелементи з донних відкладень, тоді як риби можуть акумулювати їх як із води, так і через споживання забруднених харчових компонентів (у тому числі кормів) [27]. Рівень біоаккумуляції мікроелементів варіюється залежно від їхньої хімічної форми та здатності організмів до детоксикації. Елементи, такі як Мідь (Cu), Цинк (Zn) та Селен (Se), є життєво необхідними для метаболізму, але у високих концентраціях можуть проявляти токсичний вплив. Водночас важкі метали, такі як Кадмій (Cd), Свинець (Pb) та Ртуть (Hg), навіть у низьких концентраціях можуть викликати порушення функціонування ферментних систем, гомеостазу та репродуктивних процесів у водних організмів [18].

Накопичення мікроелементів у різних тканинах організмів є нерівномірним. Наприклад, печінка та нирки риб часто мають вищі концентрації металів, ніж м'язова тканина, що пов'язано з їхньою участю в метаболічних процесах та функціями детоксикації. Деякі організми, зокрема двостулкові моллюски, використовуються як біоіндикатори забруднення водного середовища через їхню здатність концентрувати мікроелементи у своїх тканинах [21]. Важливим аспектом є біомагніфікація – процес посилення концентрації мікроелементів на вищих трофічних рівнях. Це особливо актуально для токсичних металів, таких як ртуть, яка у формі метилртуті накопичується у великих хижих рибах і становить ризик для здоров'я людини при споживанні риби [20].

Основною причиною токсичних явищ є високі рівні біоаккумуляції в організмах гідробіонтів. Високі концентрації мікроелементів можуть перевищувати толерантні межі організмів, що призводить до порушень у функціонуванні клітинних процесів (рисунок). Наприклад, надлишок Міді (Cu) може інгібувати дихальні ферменти, знижувати активність фотосинтезу у водоростей та викликати оксидативний стрес у риб. Подібним чином надлишок Цинку (Zn) впливає на роботу іонних каналів і може викликати токсичне ураження зябер у риб [1]. Токсичність мікроелементів також посилюється в умовах певних фізико-хімічних параметрів водного середовища, таких як кислотність (pH), жорсткість води та наявність органічних речовин. Наприклад, у кислих водах підвищується розчинність багатьох металів, що збільшує їх біодоступність і, відповідно, токсичність [10]. Для сталого функціонування та

зниження ризиків токсичної дії у водних екосистемах високих концентрацій мікроелементів, забезпечують моніторинг і регуляцію їх вмісту, серед яких промислові скиди, сільське господарство. Для збереження стійкості прісноводних екосистем також є важливим підвищення обізнаності громадськості та залучення її до процесу прийняття рішень.

Вплив важких металів на рослинні клітини є серйозною екологічною проблемою, що негативно позначається на рості та розвитку рослин. Накопичення таких металів, як кадмій, свинець і мідь, призводить до фітотоксичності, яка проявляється в хлорозі, зниженні біомаси та пригніченні фотосинтезу. Основним механізмом цієї токсичності є надмірне утворення активних форм кисню (АФК), що спричиняє окислювальний стрес. Для боротьби з ним рослини активують захисні механізми, зокрема синтезують фітохелатини – олігопептиди, які зв'язують важкі метали та сприяють їх детоксикації. Розуміння цих процесів є ключовим для розробки стратегій фіторе mediaції та підвищення стійкості рослин до забруднення важкими металами [14].

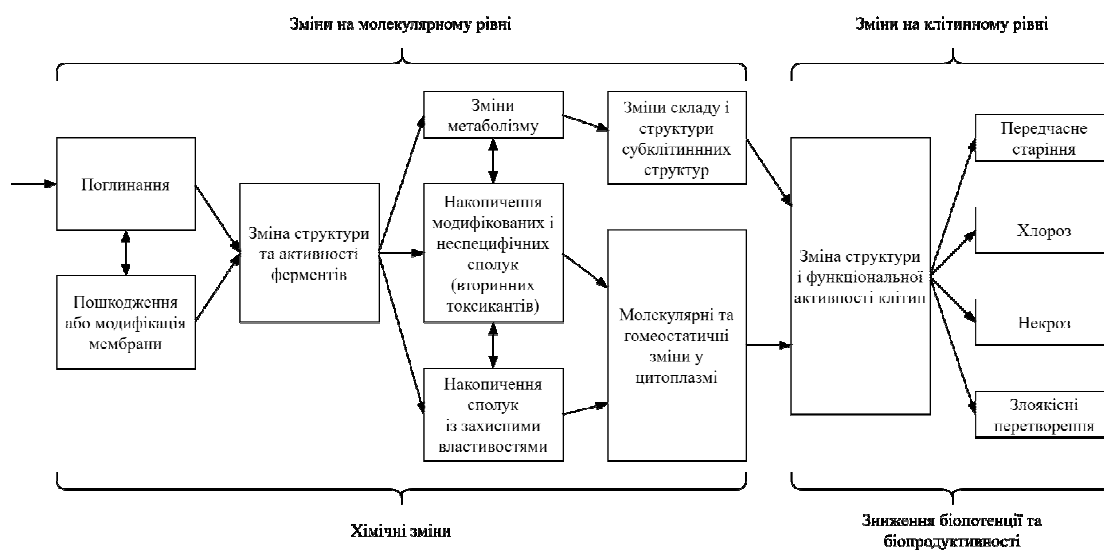


Рисунок. Схема інтоксикаційної патології клітини.

Колообіг мікроелементів у прісноводних екосистемах є важливим аспектом біогеохімічних процесів, які забезпечують підтримку життєдіяльності водних організмів. Важливість полягає в тому, що їхня присутність у належних концентраціях необхідна для підтримки екологічного балансу та здоров'я екосистеми. Після потрапляння мікроелементів у воду вони піддаються процесам мобілізації, адсорбції та осадження. Важливу роль відіграють фізико-хімічні умови водойми, такі як рН, температура, концентрація органічної речовини та наявність інших іонів. При зміні цих умов мікроелементи можуть осаджуватися на дні або, навпаки, мобілізуватися у водну товщу, стаючи доступними для біоти. Наприклад, за умов високої кислотності вони можуть сприяти осадженню заліза у вигляді оксидів, тоді як у редукційних умовах залізо може переходити у розчинений стан, доступний для засвоєння організмами.

Біологічні процеси також суттєво впливають на цикл мікроелементів. Водні рослини, фітопланктон та інші організми, що накопичують мікроелементи з води, використовують їх для своїх фізіологічних потреб, і з часом вони відмирають. У ході цього процесу мікроелементи повертаються у воду або можуть залишатись в осаді, забезпечуючи постійний колообіг. Антропогенні зміни, такі як внесення добрив і забруднення, можуть призводити до надлишку або дефіциту певних елементів у екосистемах, що впливає на їхнє здоров'я та стійкість [6].

Стійкість екосистеми визначається її здатністю витримувати та адаптуватися до змін, зберігаючи свої функції та структуру. У цьому контексті мікроелементи відіграють важливу роль у підтриманні екологічного балансу. Їхня концентрація та зміни в біогеохімічних циклах

може як позитивно, так і негативно впливати на біорізноманіття та функціонування екосистем [1]. Наприклад, дефіцит заліза є причиною зниження продуктивності популяцій організмів, а надмірна кількість певних елементів може сприяти евтрофікації, що призводить до утворення «мертвих зон» з низьким рівнем кисню.

Зростання попиту на рідкоземельні елементи (РЗЕ) пов'язане з активним розвитком сучасних технологій, які потребують унікальних фізико-хімічних властивостей цих елементів. РЗЕ, такі як Лантан (La), Неодим (Nd), Європій (Eu), Тербій (Tb) та Диспрозій (Dy), знаходять широке застосування в медицині, сучасній промисловості: виробництві електроніки, оптики, постійних магнітів, акумуляторів та каталізаторів. Особливо помітно зростає їх значення у створенні енергоефективних та екологічно чистих технологій, зокрема в електромобілях, вітрових та сонячних електростанціях. Разом з тим підвищений попит на рідкоземельні елементи створює економічні й екологічні виклики, оскільки їх видобуток і перероблення супроводжуються значним впливом на довкілля. Розвиток індустріалізації та цифровізація призводять до збільшення потреби у видобутку цих елементів, що водночас вимагає пошуку нових джерел та більш ефективних методів їх переробки. Застосування РЗЕ в різних галузях обумовлює антропогенне походження у водоймах, а недостатній контроль за видобутком може призводити до забруднення ґрунтів і водних екосистем, у тому числі прісноводних, через викиди токсичних відходів [19]. У прісноводних екосистемах вони присутні в малих концентраціях, однак джерела їхнього надходження можуть суттєво варіюватися залежно від регіону та наявності відповідного антропогенного впливу.

Серед природних джерел рідкоземельних елементів можуть бути геологічні та геотермальні джерела, атмосферні опади. З-посеред геологічних джерел варто виокремити вивітрювання порід, що можуть містити такі мінерали, як монацит, бастнезит та ксенотим, які піддаються ерозії та вимиванню у водойми. Підземні води, що проходять через зони активності гідротермальних джерел, можуть бути збагачені рідкоземельними елементами. Проте основним джерелом залишаються антропогенні впливи. Серед них – гірничовидобувна промисловість, пов'язана з видобутком та переробкою рідкоземельних мінералів, що сприяє потраплянню їх у водойми [2].

Такі елементи, як Лантан (La), Церій (Ce), Празеодим (Pr) та Неодим (Nd), відіграють важливу роль у біохімічних процесах прісноводних екосистем, яка потребує дослідження. Вони характеризуються високою хімічною активністю, здатністю до утворення комплексів з органічними сполуками та впливають на метаболізм організмів навіть у низьких концентраціях. Ці елементи демонструють високу специфічність до різних біохімічних процесів, що дозволяє їм регулювати фізіологічні процеси на клітинному рівні [26].

У рослинних організмів рідкоземельні елементи можуть стимулювати ріст і розвиток, впливаючи на фотосинтез і транспорт поживних речовин. Наприклад, Лантан (La) сприяє підвищенню активності ферментів, які беруть участь у фотосинтетичних процесах, таких як фіксація вуглецю. Ці процеси є критичними для продуктивності водних екосистем, адже саме завдяки їм формується основна біомаса. Крім того, рідкоземельні елементи впливають на синтез хлорофілу та підвищують стійкість рослин до дії важких металів у токсичних концентраціях. Деякі дослідження показують, що застосування РЗЕ в низьких концентраціях може покращувати адаптаційні механізми водоростей до змін температурного режиму та освітлення. Роль рідкоземельних елементів також простежується у впливі на мікробіоту, яка взаємодіє з рослинами. Наприклад, присутність празеодиму та неодиму в середовищі стимулює активність азотфіксуючих бактерій, що забезпечує ефективніше збагачення ґрунтів і води азотом. Такий ефект особливо важливий у прісноводних екосистемах, де дефіцит поживних речовин може стримувати розвиток біоти.

У тваринних організмів рідкоземельні елементи можуть впливати на роботу нервової системи, процеси детоксикації та ферментативну активність. Наприклад, церій здатен модулювати антиоксидантні системи, зменшуючи рівень оксидативного стресу у риб та інших водних організмів. Це сприяє покращенню виживання водних організмів у несприятливих екологічних умовах, таких як підвищений рівень забруднення.

Лантан (La) також може впливати на регуляцію обміну кальцію, що має ключове значення для функціонування м'язової та кісткової тканин. Навіть мінімальні концентрації рідкоземельних елементів в середовищі здатні покращувати якість розмноження риби, впливаючи на розвиток і функціональність гонад. Крім того, Празеодим (Pr) може відігравати важливу роль у регулюванні процесів осморегуляції у гідробіонтів, що дозволяє їм краще адаптуватися до змін хімічного складу води [25].

Хоча у низьких концентраціях рідкоземельні елементи часто виконують стимулюючі функції, їхній надлишок може призводити до токсичних ефектів. Зокрема, у прісноводних екосистемах високі концентрації можуть порушувати фізіологічні процеси, викликати дисбаланс іонів та пригнічувати ферментативну активність. Дослідження показують, що токсичність рідкоземельних елементів (зокрема кальцієвого та магнієвого балансу, що впливає на функціонування клітинних мембран і метаболізм) особливо сильно проявляється у водних організмів, які знаходяться на нижчих рівнях трофічної піраміди, таких як планктонні ракоподібні, личинки комах, риби, молюсків та водорості [22].

Так, підвищені концентрації Лантану (La) або Гадолінію (Gd) можуть блокувати кальцієві канали, що призводить до порушення нейром'язової передачі та серцевої діяльності в риби [14].

Основною причиною надмірних концентрацій рідкоземельних елементів у водному середовищі виступають антропогенні фактори (промислові викиди, фосфатні добрива тощо). Моніторинг та регуляція накопичення рідкоземельних елементів у прісноводних водоймах може сприяти відновленню деградованих екосистем та підтримці біорізноманіття. Хоча роль цих елементів у біохімічних процесах ще вивчається, зі зростанням обсягів їх вживання підвищується їх вплив на стале використання водних ресурсів [22].

Висновки

Результати цього огляду підкреслюють необхідність подальших досліджень мікро- та рідкоземельних елементів у прісноводних екосистемах, особливо щодо їхнього накопичення, взаємодії з водними організмами та потенційних довгострокових ефектів. Важливим є також впровадження регуляторних заходів, щодо удосконалення технологій очищення стічних вод і розробка екологічно сталих підходів до зниження рівня забруднення для збереження водних екосистем.

Для здоров'я та продуктивності прісноводної флори та фауни важливою є збалансована наявність мікро- та макроелементів у водному середовищі. Вони є необхідними компонентами ферментів, гормонів і вітамінів, що забезпечують обмін речовин, ріст, розмноження та інші важливі біологічні процеси. Порушення цього балансу (через забруднення важкими металами та біогенними елементами) може призводити до змін у структурі біоценозів, зниження рівня первинної продукції органічних речовин продуцентами та розвитку евтрофікації. Це, у свою чергу, знижує біорізноманіття і призводить до деградації екосистеми. Хоча функція макроелементів в евтрофікації добре досліджена, мікроелементи також відіграють важливу роль у цьому процесі. Сільськогосподарські стоки, промислові відходи, міські зливи, осушення водойм, застосування агрохімікатів та ерозія ґрунтів сприяють збагаченню водойм цими елементами, що змінює хімічний склад води, впливає на їх біодоступність.

1. Антоняк Г. Л., Багдай Т. В., Першин О. І., Бубис О. Є., Панас Н. Є., Олексюк Н. П. Метали у водних екосистемах та їх вплив на гідробіонти. *Біологія тварин*. 2015. Т. 17, № 2. С. 9–24.
2. Бабієнко В. В., Мокієнко А. В. Гігієна води та водопостачання населених місць : навч. посіб. Одеса : Прес-кур'єр, 2021. 372 с.
3. Грициняк І. І., Янович Д. О., Швець Т. М. Біологічна роль та токсична дія молібдену у гідроекосистемах (огляд). *Рибогосподарська наука України*. 2016. № 3 (37). С. 32–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/fsu2016.03.032>.
4. Гроховська Ю. Екологічні основи збалансованого використання ресурсів водних екосистем басейну Прип'яті : автореф. дис. ... д-ра біол. наук. Київ, 2017. 41 с.
5. Довгий С., Іванченко В., Коржнев М. Мінерально-сировинна комплекс та сталий розвиток України. Київ : Логос, 2014. 236 с.
6. Дудник С., Євтушенко М., Цедик В. Водна токсикологія : метод. посіб. Київ : Вид-во Укр. фітосоціол. центру, 2014. 108 с.

7. Екосистема зарегульованої водойми в умовах урбонавантаження: на прикладі Тернопільського водосховища / В. Грубінко та ін. Тернопіль : Вектор, 2013. 201 с.
8. Марків В. С., Вовчек Н. О. Кобальт у водних екосистемах: форми знаходження, біологічне значення та токсичність для риб. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*. 2024. Т. 84, № 2. С. 58–73. DOI: <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.2.7>.
9. Осташко В. Ф. Мікроелементи і макроелементи. Енциклопедія Сучасної України. URL: <https://esu.com.ua/article-69329> (дата звернення: 06.02.2025).
10. Рабченко О. О., Хоменчук В. О., Курант В. З. Ферум у водних екосистемах: форми знаходження, біологічне значення та токсичність для риб. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*. 2016. № 3–4. С. 107–119.
11. Хільчевський В. Агрогідрохімія : підручник. Київ : ДІА, 2021. 176 с.
12. A comprehensive review on metallic trace elements toxicity in fishes and potential remedial measures / S. Naz et al. *Water*. 2023. Vol. 15, No. 16. P. 3017. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15163017>.
13. A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants / R. Riyazuddin et al. *Biomolecules*. 2021. Vol. 12, No. 1. P. 43. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom12010043>.
14. Ali B., Gill R. A. Editorial: Heavy metal toxicity in plants: Recent insights on physiological and molecular aspects, volume II. *Frontiers in Plant Science*. 2022. T. 13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1016257>.
15. An updated review of toxicity effect of the rare earth elements (reese) on aquatic organisms / N. Malhotra et al. *Animals*. 2020. Vol. 10, No. 9. P. 1663. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10091663>.
16. Assessment of trace and macroelement accumulation in cyprinid juveniles as bioindicators of aquatic pollution: effects of diets and habitat preferences / K. Nyeste et al. *Scientific reports*. 2024. Vol. 14, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61986-4>.
17. Averill B., Eldredge P. General chemistry: Principles, patterns, and applications. Pearson College Div : Saylor Foundation, 2007. 1250 p.
18. Bioaccumulation and Bioremediation of Heavy Metals in Fishes—A Review / F. Jamil Emon та ін. *Toxics*. 2023. T. 11, № 6. P. 510. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics11060510>.
19. Chapin F. S., Matson P. A., Vitousek P. M. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York, NY : Springer New York, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>.
20. Che Abdullah M. I., Md Shah A. S. R., Haris H. Bioaccumulation and Health Risk Assessment of Trace Elements in *Oreochromis niloticus* in Bukit Merah Lake, Malaysia. *Tropical Life Sciences Research*. 2022. T. 33, № 2. P. 179–195. DOI: <https://doi.org/10.21315/tlsr2022.33.2.9>.
21. Distribution, partitioning, bioaccumulation of trace elements in water, sediment and fish from sewage fed fish ponds in eastern Kolkata, India / B. Kumar та ін. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2010. T. 92, № 2. P. 243–260. DOI: <https://doi.org/10.1080/02772240902942394>.
22. Effects of rare earth elements in the aquatic environment: Implications for ecotoxicological testing / M. Revel та ін. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2024. P. 1–42. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2406992>.
23. Facey J. A., Apte S. C., Mitrovic S. M. A Review of the effect of trace metals on freshwater cyanobacterial growth and toxin production. *Toxins*. 2019. T. 11, № 11. P. 643. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11110643>.
24. Hamel M. J., Gerrin W. L. A regional analysis of trace element water chemistry with applications for reconstructing environmental life history of fishes. *River Research and Applications*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.4417>.
25. Rare earth elements – Source and evolution in an aquatic system dominated by mine-Influenced waters / P. Gomes та ін. *Journal of Environmental Management*. 2022. T. 322. P. 116125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116125>.
26. Spatial Distribution and Sources of Rare Earth Elements in Urban River Water: The Indicators of Anthropogenic Inputs / X. Gao та ін. *Water*. 2023. T. 15, № 4. P. 654. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15040654>.
27. Species-specific bioaccumulation of trace metals among fish species from Xincun Lagoon, South China Sea / W. Feng та ін. *Scientific Reports*. 2020. T. 10, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77917-y>.
28. Sunda W. G. Feedback Interactions between trace metal nutrients and phytoplankton in the ocean. *Frontiers in Microbiology*. 2012. Vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00204>.
29. Trace metal levels in freshwater fish, sediment and water / Z. Sandor et al. *Environmental Science and Pollution Research*. 2001. Vol. 8, No. 4. P. 265–268. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02987404>.
30. Trace metals and nutrient analysis of marine fish species from the Gwadar coast / M. Khawar та ін. *Scientific Reports*. 2024. T. 14, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57335-0>.

References

1. Antoniuk H. L., Bahdai T. V., Pershyn O. I., Bubys O. Ie., Panas N. Ye., Oleksiuk N. P. Metaly u vodnykh ekosystemakh ta ikh vplyv na hidrobionty. *Biologhiia tvaryn*. 2015. T. 17, No 2. S. 9–24. [in Ukrainian]
2. Babiienko V. V., Mokiienko A. V. Hihiena vody ta vodopostachannia naselenykh mist : navch. posib. Odesa : Pres-kurier, 2021. 372 s. [in Ukrainian]
3. Hrytsyniak I. I., Yanovych D. O., Shvets T. M. Biologichna rol ta toksychna diia molibdenu u hidroekosystemakh (ohliad). *Rybohospodarska nauka Ukrainy*. 2016. No 3 (37). S. 32–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/fsu2016.03.032>. [in Ukrainian]
4. Hrokhovska Yu. Ekologichni osnovy zbalansovanoho vykorystannia resursiv vodnykh ekosystem baseynu Prypiati : avtoref. dys. ... d-ra biol. nauk. Kyiv, 2017. 41 s. [in Ukrainian]
5. Dovhyi S., Ivanchenko V., Korzhnev M. Mineralno-syrovynna kompleks ta stalyy rozvytok Ukrainy. Kyiv : Lohos, 2014. 236 s. [in Ukrainian]
6. Dudnyk S., Yevtushenko M., Tsedyk V. Vodna toksykologhiia : metod. posib. Kyiv : Vyd-vo Ukr. fitosotsiol. tsentru, 2014. 108 s. [in Ukrainian]
7. Ekosystema zarehulovanoi vodoimy v umovakh urbonavantazhennia: na prykladi Ternopilskoho vodoshkovyshcha / V. Hrubinko ta in. Ternopil : Vektor, 2013. 201 s. [in Ukrainian]
8. Markiv V. S., Vovchek N. O. Kobalt u vodnykh ekosystemakh: formy znakhodzhennia, biologichne znachennia ta toksychnist dlia ryb. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biologhiia*. 2024. T. 84, No 2. DOI: <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.2.7>. [in Ukrainian]
9. Ostashko V. F. Mikroelementy i makroelementy. Entsyklopediia Suchasnoi Ukrainy. URL: <https://esu.com.ua/article-69329> (data zvernennia: 06.02.2025). [in Ukrainian]
10. Rabcheniuk O. O., Khomenchuk V. O., Kurant V. Z. Ferum u vodnykh ekosystemakh: formy znakhodzhennia, biologichne znachennia ta toksychnist dlia ryb. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biologhiia*. 2016. No 3–4. S. 107–119. [in Ukrainian]
11. Khilchevskiy V. Ahrohidrokhimiia : pidruchnyk. Kyiv : DIA, 2021. 176 s. [in Ukrainian]
12. A comprehensive review on metallic trace elements toxicity in fishes and potential remedial measures / S. Naz et al. *Water*. 2023. Vol. 15, No. 16. P. 3017. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15163017>.
13. A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants / R. Riyazuddin et al. *Biomolecules*. 2021. Vol. 12, No. 1. P. 43. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom12010043>.
14. Ali B., Gill R. A. Editorial: Heavy metal toxicity in plants: Recent insights on physiological and molecular aspects, volume II. *Frontiers in Plant Science*. 2022. T. 13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1016257>.
15. An updated review of toxicity effect of the rare earth elements (reese) on aquatic organisms / N. Malhotra et al. *Animals*. 2020. Vol. 10, No. 9. P. 1663. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10091663>.
16. Assessment of trace and macroelement accumulation in cyprinid juveniles as bioindicators of aquatic pollution: effects of diets and habitat preferences / K. Nyeste et al. *Scientific reports*. 2024. Vol. 14, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61986-4>.
17. Averill B., Eldredge P. General chemistry: Principles, patterns, and applications. Pearson College Div : Saylor Foundation, 2007. 1250 p.
18. Bioaccumulation and Bioremediation of Heavy Metals in Fishes—A Review / F. Jamil Emon ta in. *Toxics*. 2023. T. 11, № 6. P. 510. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics11060510>.
19. Chapin F. S., Matson P. A., Vitousek P. M. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York, NY : Springer New York, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>.
20. Che Abdullah M. I., Md Shah A. S. R., Haris H. Bioaccumulation and Health Risk Assessment of Trace Elements in *Oreochromis niloticus* in Bukit Merah Lake, Malaysia. *Tropical Life Sciences Research*. 2022. T. 33, № 2. P. 179–195. DOI: <https://doi.org/10.21315/tlsr2022.33.2.9>.
21. Distribution, partitioning, bioaccumulation of trace elements in water, sediment and fish from sewage fed fish ponds in eastern Kolkata, India / B. Kumar ta in. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2010. T. 92, № 2. P. 243–260. DOI: <https://doi.org/10.1080/02772240902942394>.
22. Effects of rare earth elements in the aquatic environment: Implications for ecotoxicological testing / M. Revel ta in. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2024. P. 1–42. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2406992>.
23. Facey J. A., Apte S. C., Mitrovic S. M. A Review of the effect of trace metals on freshwater cyanobacterial growth and toxin production. *Toxins*. 2019. T. 11, № 11. P. 643. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11110643>.
24. Hamel M. J., Gerrin W. L. A regional analysis of trace element water chemistry with applications for reconstructing environmental life history of fishes. *River Research and Applications*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.4417>.

25. Rare earth elements – Source and evolution in an aquatic system dominated by mine-Influenced waters / P. Gomes та ін. *Journal of Environmental Management*. 2022. Т. 322. Р. 116125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116125>.
26. Spatial Distribution and Sources of Rare Earth Elements in Urban River Water: The Indicators of Anthropogenic Inputs / X. Gao та ін. *Water*. 2023. Т. 15, № 4. Р. 654. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15040654>.
27. Species-specific bioaccumulation of trace metals among fish species from Xincun Lagoon, South China Sea / W. Feng та ін. *Scientific Reports*. 2020. Т. 10, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77917-y>.
28. Sunda W. G. Feedback Interactions between trace metal nutrients and phytoplankton in the ocean. *Frontiers in Microbiology*. 2012. Vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00204>.
29. Trace metal levels in freshwater fish, sediment and water / Z. Sandor et al. *Environmental Science and Pollution Research*. 2001. Vol. 8, No. 4. P. 265–268. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02987404>.
30. Trace metals and nutrient analysis of marine fish species from the Gwadar coast / M. Khawar та ін. *Scientific Reports*. 2024. Т. 14, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57335-0>.

¹A. Yu. Korniienko, ¹V. V. Hrubinko, ¹H. V. Chvaliuk, ²I. V. Kalinin

¹Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

TRACE AND RARE EARTH ELEMENTS IN WATER AND AQUATIC ORGANISMS OF FRESHWATER ECOSYSTEMS

This review article comprehensively analyzes the role of trace elements and rare earth elements (REEs) in freshwater ecosystems. It covers their sources, biological significance, accumulation patterns, and potential ecological risks by synthesizing existing research on their involvement in biochemical processes, effects on biodiversity, and contributions to ecosystem stability and eutrophication. Trace elements are crucial in aquatic ecosystems, influencing physiological processes such as enzyme activity, photosynthesis, and metabolism in organisms. Their presence is primarily due to natural sources like rock weathering, atmospheric deposition, and biological interactions. However, anthropogenic activities – including industrial discharges, agricultural runoff, and wastewater effluents – significantly alter their concentrations, leading to potential toxicity and ecological imbalances. The review discusses the bioaccumulation of trace elements in aquatic flora and fauna, detailing factors affecting their uptake, storage, and transfer within trophic networks. It also addresses the risks of excessive concentrations, which can cause toxic effects, oxidative stress, and physiological disorders in aquatic organisms. A significant portion of the review focuses on rare earth elements, whose increasing use in modern technologies has raised environmental concerns. Although REEs are typically found in low concentrations in freshwater, their accumulation from industrial sources can pose risks to aquatic life. The article examines their potential roles in biological processes, including interactions with essential nutrients and impacts on cellular metabolism. While some studies suggest beneficial effects at trace levels, higher concentrations have been linked to toxicity, affecting various aquatic trophic levels. The review further explores mechanisms of REE contamination, their mobility in freshwater systems, and long-term ecological consequences. The biogeochemical cycling of both trace and rare earth elements is analyzed, considering factors like pH, redox conditions, and organic matter interactions, which influence their bioavailability, toxicity, distribution, and persistence in aquatic environments. The review emphasizes the importance of monitoring trace and rare earth element concentrations as a key component of freshwater ecosystem management strategies. Given the increasing anthropogenic impact on aquatic environments, understanding the dynamics of these elements is crucial for predicting and mitigating their ecological effects. The findings underscore the need for continuous research on trace and rare earth elements in freshwater ecosystems, particularly regarding their accumulation patterns, interactions with aquatic organisms, and potential long-term consequences. The review concludes by highlighting the necessity of implementing regulatory measures, improving wastewater treatment technologies, and developing environmentally sustainable practices to minimize contamination and preserve ecosystem health.

Key words: trace elements, bioaccumulation, toxicity, eutrophication, rare earth elements, freshwater ecosystems, anthropogenic impact.

Надійшла 13.05.2025.