

УДК 504.054:[546.48:556.5]:597.2/.5.044

doi: 10.25128/2078-2357.25.4.12

¹Б. М. ПЕТРУШКА , ¹Б. О. ІВАНЦЬКИЙ , ²С. Б. ПЕТРУШКА,
¹В. О. ХОМЕНЧУК , ¹В. З. КУРАНТ 

¹Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027

²Приватний фаховий навчальний заклад «Медичний коледж»
вулиця Текстильна, 8А, Тернопіль, 46000
E-mail: bodik_p@ukr.net

КАДМІЙ У ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ: ВМІСТ, ФОРМИ ЗНАХОДЖЕННЯ ТА ТОКСИЧНІСТЬ ДЛЯ РИБ

В огляді проаналізовано вміст та форми знаходження кадмію в природних водах, особливості його накопичення та токсичності для риб. Відмічено, що метал може існувати у водних екосистемах у різних формах. Відзначено, що значною мірою впливає на токсичність забруднювача присутність у воді зважених та розчинених органічних речовин. Показано, що токсична дія сполук металу обумовлюється не тільки концентрацією та формами знаходження у водному середовищі, але й фізико-хімічними показниками води та фізіологічним станом організму риб, які суттєво впливають на біодоступність та швидкість акумуляції металу.

Ключові слова: риби, гідроекосистеми, кадмій, токсичність.

Важкі метали є домінуючими забруднювачами навколишнього водного середовища через їхню токсичність, стійкість у водних розчинах та здатність до біоаккумуляції [19, 29]. Ступінь впливу сполук металів, здебільшого токсикантів, на гідробіоти визначається ймовірністю попадання в гідросферу абіотичних важких металів, формою знаходження та концентрацією у воді, тривалістю впливу та токсикорезистентністю організмів [3, 17].

Природними джерелами важких металів є вивітрювання металовмісних порід та виверження вулканів, тоді як антропогенні джерела включають видобуток корисних копалин та різноманітну промислову та сільськогосподарську діяльність. Видобуток і переробка мінеральних ресурсів, а також їх подальше застосування у промисловості та сільському господарстві призвели до збільшення вивільнення цих елементів із природного середовища та порушення їх біогеохімічних циклів [6]. Слід зазначити також те, що важкі метали не розкладаються природним чином, на відміну від органічних сполук, а залишаються у компонентах гідроекосистем протягом тривалого часу [42]. Вони безперервно циркулюють у воді та накопичуються в донних відкладах у різних формах [7, 59].

Збільшення попиту на важкі метали створює тиск на водні екосистеми. Добування багатьох може призвести до підвищення їх концентрації та побічних продуктів, що пов'язані з отриманням металів, у ґрунтах та водних об'єктах [31].

Усі важкі метали за їх значенням для біоти можна розподілити на есенціальні (біогенні) та неесенціальні (токсичні), при цьому їх біологічна або токсична дія проявляється за дуже низьких концентрацій та є неоднаковою для різних видів гідробіонтів [42]. Есенціальні метали, такі як мідь, цинк, хром, нікель, кобальт, молібден, залізо та інші, виконують важливі біологічні функції, а їх дефіцит призводить до порушення функціонування метаболічних систем водних організмів. Неесенціальні метали, а саме кадмій, ртуть, олово, свинець не мають доведених біологічних функцій, разом з тим збільшення концентрації у воді понад норму як біогенних, так і токсичних металів може призвести до їх підвищеного акумулявання в тканинах і органах гідробіонтів, що зі свого боку обумовлює їх токсичну дію [19].



©2025 Б. М. Петрушка та співавт. Стаття відкрита для доступу та розповсюджується на умовах ліцензії [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), яка дозволяє необмежене використання, розповсюдження та відтворення на будь-якому носії за умови належного цитування оригінальної роботи.

Кадмій є типовим токсикантом. Він відноситься до рідких, розсіяних елементів і міститься в складі ізоморфних домішок у багатьох мінералах, таких як грінокіт CdS , отавіт CdCO_3 , монтепоніт CdO і кадмоселіт CdSe . Вміст кадмію в земній корі, ґрунті та природних водах коливається від 10^{-5} до 10^{-6} %. У товщі земної кори кадмій переміщується підземними водами разом з іншими халькофільними елементами. Його міграція в навколишньому середовищі залежить від виду його сполук та рН середовища. У лужних ґрунтах кадмій менш рухливий, ніж в кислих (особливо при $\text{pH}=5$) [33].

Вміст та форми знаходження в природних водах. У навколишнє середовище кадмій найчастіше надходить зі стоками свинцево-цинкових заводів, підприємств гірничодобувної, збагачувальної та електролізної промисловості, низки хімічних підприємств, гальванічного виробництва. Значний внесок у забруднення навколишнього середовища кадмієм здійснюють стічні води з територій сільськогосподарських угідь при використанні фосфатних добрив [35].

У водне середовище кадмій поступає з такими мінеральними сполуками, як CdO , CdS , $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ та деякими іншими. Потрапляючи у водойми, сполуки кадмію не піддаються деструкції і не виводяться з них природним шляхом, що веде до накопичення токсикантів в організмі гідробіонтів та донних відкладах. Кадмій легко вивільняється з мінеральних сполук за дії кислотних опадів, створюючи підвищені концентрації у воді, і становить високу екологічну небезпеку для навколишнього середовища [4].

Середня концентрація кадмію в морській воді складає $0,11 \text{ мкг/дм}^3$. У прісних водоймах України його вміст коливається в досить широких межах. Так, у Запорізькому водосховищі він складає $0,30\text{--}10,40 \text{ мкг/дм}^3$, а в Каховському складає $0,30\text{--}4,80 \text{ мкг/дм}^3$. У донних відкладах вміст кадмію значно вищий. Так, у верхньому 5-сантиметровому шарі донних відкладів Дніпровських водосховищ він коливається від $0,6$ до $3,9 \text{ мкг/дм}^3$ сухої маси [5]. Прісні підземні води містять більше вільних іонів Cd^{2+} (до 90 %), ніж стічні води (67–71 %). Стосовно комплексів кадмію з гуміновими кислотами, то їх кількість не перевищує 37–39 % [24].

Досліджуючи форми знаходження кадмію в прісних водах ріки Ярра в Австралії, було виявлено, що загальний вміст цього металу у воді змінювався від $0,29$ до $0,55 \text{ мкг/дм}^3$ [27]. Водночас розчинний кадмій (який пройшов через фільтр) складає $0,21\text{--}0,47 \text{ мкг/дм}^3$ (середнє значення $0,33 \text{ мкг/дм}^3$). За такої умови приблизно 75 % розчинного кадмію припадало на долю фракцій, здатних до іонного обміну. Понад 80 % складали вільні іони Cd^{2+} , і невелику частку – CdCl^+ . Було також показано, що органічні ліганди здатні активно брати участь в комплексоутворенні з кадмієм при концентрації, яка перевищує 10^{-6} моль.

Авторами [10] досліджено вміст кадмію у воді забруднених озер. Була показана відносно велика участь органічних комплексів кадмію у продукуванні автохтонних органічних речовин макрофітами та фітопланктоном. Дослідники прийшли до висновку, що наявність високих концентрацій ліганд, здатних зв'язувати кадмій, недостатня для зниження концентрації вільного кадмію в природному середовищі до рівня безпечного для гідробіонтів.

Щодо взаємодії з кадмієм хлоридів, то слід зазначити, що вони більш вибіркові, ніж органічні комплексоутворювачі [38]. У важких металах ступінь ковалентності зв'язку метал–хлорид значно змінюється. Саме тому хлоридні комплекси конкурують з органічними комплексами важких металів в наступній послідовності $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn}$. Крім того, хлоридні комплекси важких металів досить мобільні та стійкі, і вони, можливо, відіграють важливу роль в поширенні важких металів у навколишньому середовищі. Кадмій також активно реагує з сіркою, селеном, азотом, а також SH-групами. Органічні сполуки, які містяться в природних водах, такі як амінокислоти, аміноцукри, полісахариди, гідроксо- і карбоксильні кислоти аліфатичного та ароматичного ряду, також містять певні донорні атоми, які можуть утворювати сполуки з кадмієм [38].

Слід зазначити, що комплексоутворення для іонів Cd^{2+} виражене в меншій мірі, ніж для інших металів. Це видно із діаграм стосовно форм кадмію (II) в залежності від рН середовища в системах, які містять тільки неорганічні ліганди, а також суміш неорганічних та органічних ліганд [4]. У першому випадку значна частина кадмію (II) представлена вільними незакомплексованими іонами Cd^{2+} . Крім того, спостерігається наявність гідроксокомплексу $[\text{CdOH}]^+$ та карбонатного комплексу кадмію (II). Водночас вміст інших неорганічних комплексних сполук незначний.

Переважання в складі розчинених форм кадмію вільних іонів Cd^{2+} пояснюється малою стійкістю його комплексів з гуміновими та фульвокислотами, а також з іншими органічними комплексоутворюючими сполуками природних вод [4]. Так, авторами [8] було встановлено, що у водному розчині, який містив 20 мг/дм^3 гумінових кислот, близько 37 % кадмію залишається незакомплексованим, тоді як мідь у тих же умовах повністю зв'язується в комплексах, навіть при значно нижчій концентрації гумінових кислот (2 мкг/дм^3). Більш слабкі комплексоутворюючі властивості кадмію, порівнюючи з іншими металами, були виявлені також у дослідях по визначенню комплексоутворюючих властивостей як природних вод [25, 45, 50], так і виділених препаратів фульвокислот [44].

Поряд з цим, деякі автори [60] вважають, що кадмій (II) утворює досить міцні комплексні сполуки з органічними лігандами природного походження. На підтвердження сказаного були отримані дані стосовно більш високого ступеня закомплексованості кадмія в природних водах [52]. Зокрема, дослідження різних форм кадмію у воді оз. Мічіган через 24 години контакту з водою дало змогу виявити наступний розподіл металу: 73 % його знаходилося в складі розчинених органічних комплексів, 13 % – в колоїдному розчині і 14 % – у підвішеному стані [9]. Низький вміст підвішених форм кадмію відмічено для вод деяких озер США [10]. У більшості випадків він не перевищував 8,3–31,7 %. Так, в озері Мічіган цей показник складав 14 %, а у воді озера Онтаріо він вже був на рівні 20–60 % [40]. В озерних водах Австралії на долю завислих форм кадмію припадає не більше, ніж 26,9 % [28].

Адсорбція кадмію (II) на підвішених часточках природних вод досліджена в роботах асторів [24, 43]. Було показано, що значна частина іонів Cd^{2+} адсорбується на поверхні глинистих часток [56], при цьому кількість адсорбованого металу зростає із підвищенням pH [43]. Результати досліджень кількості адсорбції кадмію на глинистих мінералах в присутності комплексоутворювачів (тартрат, гліцин, ЕДТА) показали, що поглинання іонів Cd^{2+} у більшості випадків різко знижується в результаті утворення негативно заряджених комплексів [23]. Посилення адсорбції в присутності гліцину пояснюється існуванням позитивно заряджених комплексів кадмію з вказаними лігандами.

Додавання до суспензії глини фульвокислот веде до збільшення сорбції Cd^{2+} , а також і інших металів (Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+}), при значенні pH від 3,0 до 6,0. При більш високих значеннях pH поглинання деяких металів глинами знижується, що можна пояснити утворенням розчинних у воді фульватних комплексів [51].

Досліджено адсорбційні властивості суспензій гумінових кислот по відношенню до іонів Cd^{2+} [43]. Було показано, що адсорбція кадмію гуміновими кислотами значно зростає із збільшенням pH середовища. При цьому відзначено, що кадмій менш активно зв'язується з суспензією гумінових кислот, ніж інші метали (Cu , Pb , Zn та ін.). Встановлено, що близько половини адсорбованого кадмію переходить в розчин під дією ацетату амонію в концентрації 1 моль/дм^3 .

Лабораторні дослідження адсорбції кадмію та інших важких металів на целюлозі показали, що максимум поглинання іонів металів досягається при pH 6,0–7,0 [22]. У той же час процес адсорбції на целюлозі має багато спільного із поглинанням іонів металів глинистими частками. Зокрема, аніонні комплекси практично не адсорбуються, а катіонні сорбуються в меншій мірі, ніж вільні гідратовані іони.

Таким чином, форми існування кадмію (II) в поверхневих прісних водах визначаються сукупністю низки чинників, а також хімічними властивостями елемента. Серед розчинених його форм у більшості випадків переважають вільні (незакомплексовані) іони, які складають не менше 50 % валового вмісту. Міцність його гуматних та фульватних комплексів набагато нижча, ніж у перерахованих вище металів. Під дією сильних комплексоутворювачів як природного, так і антропогенного походження, кадмій може десортуватися із донних відкладів та підвішених часток і переходити в товщу води, де він буде загрожувати життєдіяльності гідробіонтів.

Вміст в організмі та токсичність для риб. Кадмій є високо токсичним металом. Він є токсичним щодо гідробіонтів різних трофічних рівнів, зокрема риб [41, 48]. Уже при концентрації у воді $0,02\text{--}1,0 \text{ мкг/дм}^3$ спостерігається пригнічення реакції фотосинтезу у водних рослин, а при концентрації $0,003\text{--}0,5 \text{ мкг/дм}^3$ гинуть до 50 % прісноводних безхребетних. Що стосується риб, то в них уже при концентрації 4 мкг/дм^3 значною мірою пригнічується ферментативна активність печінки, нирок та деяких інших органів [5].

Потрапляючи у водойми, сполуки кадмію не підлягають деструкції і не виводяться з них природним шляхом, що веде до накопичення токсикантів в організмі гідробіонтів і донних відкладках. Кадмій легко вивільняється з мінеральних сполук за дії кислотних опадів, утворюючи підвищену концентрацію у воді і тим самим спричинює високу екологічну небезпеку для навколишнього середовища [4, 38].

Як вже було відзначено, кадмій належить до неесенціальних металів та особливо небезпечних забруднювачів водних екосистем. Найбільшою мірою вплив кадмію на риб проявляється в низькомінералізованих і закислених з низьким значенням рН водах. Лососеві, порівнюючи з іншими видами риб, є найбільш вразливими до дії токсиканта [1, 12].

В організм риб кадмій надходить бронхіальним (через зябра) і аліментарним (зі споживаним кормом) шляхами. Роль першого знижується за присутності іонів цинку [1]. Надійшовши з їжею, кадмій поглинається всіма відділами кишківника, а також шлунком. Крім того, додатковим шляхом надходження токсиканта в організм риб є абсорбція його шкірою і нюховим епітелієм [36]. Проте їхня роль, порівнюючи з основними шляхами, досить незначна.

За надзвичайно високих концентрацій у воді кадмій осідає на зябрах риб, що призводить до задухи, а за більш тривалої дії – до розвитку гострої гіперплазії і некрозу зябрового епітелію. За більш наближених до екологічно реальних концентрацій гострий вплив кадмію виявляється у порушенні іонного гомеостазу, зокрема регуляції кальцію, що є прямою причиною токсичного ефекту [20, 46].

Крім зябер кадмій накопичується в тканинах внутрішніх органів риб. Водночас його вміст у м'язах незначний. Так, у дослідях на окунях було виявлено наступний розподіл цього металу: м'язи – 1,2 %, печінка – 43,4 %, нирки – 1,6 %, кишківник – 6,9 %, зябра – 11,3 %, кістки – 0,8 %, шкіра – 6,9 % [18]. Як бачимо, рівень накопичення кадмію в м'язовій тканині досить низький, тому він не є загрозою у використанні м'язів риб для харчування. Не більше ніж 4 % екземплярів риб, спійманих в континентальних водах США, містили кадмій в концентрації не більше ніж 0,5 мг/кг живої маси [57]. Водночас у різних індустріальних районах світу вміст кадмію в прісних водах досить значний. Так, в естуарії річки Севері (Великобританія) мерлани, які тут водяться, містять кадмій у м'язевій тканині до 2,5 мг/кг живої маси [11], а в водах північно-східного побережжя Великобританії у виловлених тут трісці і камбалі середній вміст кадмію в м'язах складав 1,3 і 1,4 мг/кг відповідно [61].

Загалом рівень кадмію в м'язах риб не може бути безпосередньо пов'язаний із його концентрацією у воді. Крім того, для більшості видів костистих риб часто відсутня кореляція між характером їжі та рівнем кадмію в організмі [38]. Хоча концентрація металу в тканинах риб може зростати із збільшенням їх розміру та віком, ученими встановлено низку виключень із цього правила. Так, за даними авторів [39], для 9 видів прісноводних риб твердість води не впливала на швидкість поглинання кадмію, у той час як присутність хелатоутворювача ЕДТА значно знижувала здатність накопичування кадмію організмом коропа [39]. У лабораторних умовах також було показано, що накопичення кадмію тканинами окуня прямо залежне від температури [18].

Пороги гострої токсичності кадмію (LC_{50} , 96 годин) змінюються від 0,09 до 105 мкг/дм³ для прісноводних риб та від 8 до 85 мкг/дм³ для морських. Молодь риб більш чутлива до кадмію, ніж статевозрілі особини та ікра [38]. Хоча мальки чавичі і райдужної форелі були досить стійкими до дії кадмію [1]. Крім того відомо, що репродуктивна функція збільшує чутливість деяких видів риб до цього металу [38].

Механізм токсичної дії кадмію за його хронічного впливу вивчений недостатньо. За тривалої дії метал через систему кровообігу переноситься в усі тканини організму риб, здійснюючи вплив на ембріональний розвиток, іонорегуляцію, енергетичний обмін, захисні функції організму, відтворення та стійкість до стресових ситуацій [36]. У форелі, підданій хронічному впливу кадмію (більше 178 діб) за концентрації 0,0032–0,0064 мг/дм³, спостерігалось зниження в плазмі крові рівня кальцію, натрію, калію і хлоридів, а за вищої концентрації – магнію. Разом з тим, за низького вмісту токсиканта зазначені ефекти виявляються незначною мірою [26]. Таку залежність було виявлено у дослідях з молоддю антарктичного лосося. Після 3-місячного витримування риб у воді за концентрації токсиканта на рівні 0,00087 мг/дм³ у них відзначали зниження кальцію і калію в плазмі крові [49].

Дія кадмію на організм риб також знижує їх здатність до осмотичної регуляції. Хоча, за даними авторів [32], у райдужної форелі, яка піддавалася дії кадмію в концентрації 4 мкг/дм³ протягом десяти днів, не спостерігали негативного впливу на ріст піддослідних особин, але при хронічній дії цього металу виявили послаблення ензиматичної активності в печінці та нирках.

Порушення механізмів іонорегуляції відбувається за класичною схемою: пошкодження – відновлення – аклімация [30, 34]. Процес відновлення включає два аспекти: синтез і мобілізацію сполук, таких як металотіонеїни або глутатіон, що зв'язують метали та беруть участь у процесах детоксикації, а також репараційні та компенсаційні процеси, спровоковані акумуляцією токсиканта [58]. Накопичення токсиканта спричиняє посиленню продукування активних форм кисню (пероксиду водню, гідроксил-радикалів, супероксиданіон-радикалів) та інших кисневмісних форм [2].

Кадмій інгібує мультиферментний мітохондріальний електротранспортний ланцюг, що призводить до інактивації ферментів, зокрема зниження активності АТФ-ази. Вільним радикалам властива висока реактивність та здатність порушувати структуру клітинних мембран та активність ферментів, що призводить до оксидативного стресу [13].

Досліджуючи вплив сполук кадмію на ріст і виживання риб, були проведені досліді з мальмою, витримування якої за концентрації токсиканта на рівні 0,0008 мг/дм³ призводило до 37 %-ної смертності в перші 4 доби і зниження темпу росту в наступні 51 добу [53]. У трьохрічному експерименті з американською палією виявлені зниження темпу росту і смертність самців-плідників за вмісту 0,0034 мг/дм³ металу у воді [55]. У райдужної форелі, підданій впливу розчину кадмію в концентрації 0,0055 мг/дм³ протягом 65 тижнів, не було виявлено смертності або порушень у рості. Хоча, разом з тим, були зафіксовані затримки або зупинки репродуктивного розвитку, які спостерігали навіть за нижчого вмісту токсиканта (0,018 мг/дм³) [14].

Ефект впливу кадмію на ендокринну систему риб виявляється у зниженні рівнів кортизолу і тироксину, інгібуванні мРНК гепатоцитів, зниженні індукції вітелогеніну та затримці онтогенезу [21]. Поряд з цим відбуваються і гістологічні зміни у тканинах нирок, печінки та зябер [36].

Генетичними дослідженнями кадмієвої інтоксикації мальків райдужної форелі за короткотривалої експозиції (24–96 год.) в розчині токсиканта концентрацією 0,05–0,5 мг/дм³ було встановлено підвищення експресії генів, що мають відношення до мітохондріальної активності, перетворення іонів металів та біосинтезу протеїнів, як активність генів, залучених у імунних і стресових реакціях, пригнічувалася [47].

Поведінкові зміни риб у відповідь на забруднення води кадмієм проявлялися в їх дезорієнтації, відхиленні у взаємовідносинах «хижак–жертва», зниженні споживання корму, порушенні ієрархічно обумовленої поведінки [37, 54].

Екскреція кадмію здійснюється, в основному, кишківником риб з фекаліями та слизовими виділеннями. Також участь у цьому процесі беруть печінка (з жовчю), нирки (з сечею) та зябра. Значення ниркового шляху виведення металу підвищується за хронічного аліментарного надходження токсиканта [15, 16].

Відзначаємо, що токсичність і біодоступність кадмію зумовлюється гідрохімічним розчином водойми. Чинником, що значною мірою впливає на зниження токсичності забруднювача, є присутність у воді зв'язаних та розчинених органічних речовин (продуктів метаболізму гідробіонтів – органічних кислот, амінокислот, вуглеводів, ліпідів, білків, поліфенолів, біополімерів – гумінових кислот, фульвокислот, полісахаридів; органічних речовин антропогенного походження – танінів, синтетичних поверхнево-активних речовин). Вони зв'язують кадмій, утворюючи комплексні сполуки. Разом з тим, здатність до комплексоутворення у кадмію є набагато нижчою, ніж у інших важких металів. Токсичність кадмію знижується також із підвищенням твердості води (за рахунок конкуруючої дії іонів кальцію і магнію) та солоності води (за рахунок утворення хлоридних комплексів кадмію).

Висновки

Отже, незважаючи на порівняно невелику кількість кадмію, яка міститься у водоймах, водна біота може піддаватися значному негативному впливу цього токсиканта. Тому для управління екологічними ризиками внаслідок токсичного впливу кадмію необхідно здійснювати постійний моніторинг цього металу як у водному середовищі, так і в організмі гідробіонтів, зокрема риб.

1. Грициняк І. І., Янович Л. О., Швець Т. М. Екотоксикологія лососевих риб. Київ : Видавництво ТОВ «ДІА». 2015. 472 с.
2. Грубінко В. В. Адаптивні стратегії токсикорезистентності до металів у гідробіонтів. *Наукові записки ТНПУ. Серія: Біологія*. 2017. № 2 (69). С. 129–162.
3. Грубінко В. В. Системна оцінка метаболічних адаптацій у гідробіонтів. *Наукові записки ТНПУ. Серія: Біологія*. 2001. № 4 (15). С. 36–39.
4. Линник П. М., Искра І. В. Кадмій в поверхневих водах: вміст, форми знаходження, токсична дія. *Гідробіол. журн*. 1997. № 6. С. 72–87.
5. Романенко В. Д. Основи гідроекології. Київ : Обереги, 2001. 728 с.
6. A review on heavy metal-induced toxicity in fishes: Bioaccumulation, antioxidant defense system, histopathological manifestations, and transcriptional profiling of genes / M. Kumar et al. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2023. P. 127377. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2023.127377>.
7. Accumulation of heavy metals (Ni, Cu, Cd, Cr, Pb, Zn, Fe) in the soil in water and water collected from Tanda Dam Kohat / Nazir R. et al. *J. Pharm. Sci. Res*. 2015. Vol. 7 (3). P. 89–97.
8. Allen H. E. Studies of trace metals in aquatic environment using anodic stripping voltammetry. – In: Modern analytical polarography. Workshop Manual by PAR Corporation. New-Jersey. 1973. P. VIII. P. 1–14.
9. Allen H. E., Boonlayangoor C., Noll K. E. Changes in physicochemical forms of lead and cadmium added to freshwater. *Environment International*. 1982. Vol. 7, no. 5. P. 337–341. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(82\)90126-x](https://doi.org/10.1016/0160-4120(82)90126-x).
10. Aspects of the aquatic chemistry of cadmium and zinc in a heavy metal contaminated lake / B. K. Shephard et al. *Water Research*. 1980. Vol. 14, no. 8. P. 1061–1066. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90153-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90153-0).
11. Badsha K. S., Sainsbury M. Uptake of zinc, lead and cadmium by young whiting in the Severn Estuary. *Marine Pollution Bulletin*. 1977. Vol. 8, no. 7. P. 164–166. [https://doi.org/10.1016/0025-326x\(77\)90270-3](https://doi.org/10.1016/0025-326x(77)90270-3).
12. Cadmium accumulation, gill Cd binding, acclimation, and physiological effects during long term sublethal Cd exposure in rainbow trout / L. Hollis et al. *Aquatic Toxicology*. 1999. Vol. 46, no. 2. P. 101–119. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(98\)00118-0](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(98)00118-0).
13. Cadmium inhibits the electron transfer chain and induces Reactive Oxygen Species / Y. Wang et al. *Free Radical Biology and Medicine*. 2004. Vol. 36, no. 11. P. 1434–1443. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2004.03.010>.
14. Cadmium toxicity to rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* walbaum and brown trout *Salmo trutta* L. over extended exposure periods / V. Brown et al. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 1994. Vol. 29, no. 1. P. 38–46. [https://doi.org/10.1016/0147-6513\(94\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0147-6513(94)90028-0).
15. Chowdhury M. J., McDonald D. G., Wood C. M. Gastrointestinal uptake and fate of cadmium in rainbow trout acclimated to sublethal dietary cadmium. *Aquatic Toxicology*. 2004. Vol. 69, no. 2. P. 149–163. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2004.05.002>.
16. Chowdhury M. J., Wood C. M. Renal function in the freshwater rainbow trout after dietary cadmium acclimation and waterborne cadmium challenge. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. 2007. Vol. 145, no. 3. P. 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2007.01.004>.
17. Ecological Biomarkers: Indicators of Ecotoxicological Effects. Taylor & Francis Group, 2012. 464 p.
18. Edgren M., Notter M. Cadmium uptake by fingerlings of perch (*Perca fluviatilis*) studied by Cd-115m at two different temperatures. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 1980. Vol. 24, no. 1. P. 647–651. <https://doi.org/10.1007/bf01608168>.
19. Effect of heavy metals on fish larvae deformities: A review / D. G. Sfakianakis et al. *Environmental Research*. 2015. Vol. 137. P. 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.014>.
20. Effects of chronic sublethal exposure to waterborne Cu, Cd or Zn in rainbow trout 2: tissue specific metal accumulation / J. C. McGeer et al. *Aquatic Toxicology*. 2000. Vol. 50, no. 3. P. 245–256. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(99\)00106-x](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(99)00106-x).
21. Effects of Subchronic Exposure to Cadmium Chloride on Endocrine and Metabolic Functions in Rainbow Trout *Oncorhynchus mykiss* / A. C. Ricard et al. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 1998. Vol. 34, no. 4. P. 377–381. <https://doi.org/10.1007/s002449900333>.
22. Farrah H., Pickering W. The effect of pH and ligands on the sorption of heavy metal ions by cellulose. *Australian Journal of Chemistry*. 1978. Vol. 31, no. 7. P. 1501–1509. <https://doi.org/10.1071/ch9781501>.
23. Farrah H., Pickering W. The sorption of lead and cadmium species by clay minerals. *Australian Journal of Chemistry*. 1977. Vol. 30, no. 7. P. 1417–1422. <https://doi.org/10.1071/ch9771417>.
24. Gardiner J. The chemistry of cadmium in natural water—I a study of cadmium complex formation using the cadmium specific-ion electrode. *Water Research*. 1974. Vol. 8, no. 1. P. 23–30. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(74\)90005-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(74)90005-0).
- 98 ISSN 2078-2357. Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер.: Біол., 2025. Т. 85, № 4

25. Giesy J. P. Cadmium interactions with naturally occurring organic ligands. In: Cadmium in the environment. Part I. Ecological cycling. New York. Wiley Interscience publ. 1980. P. 237–256.
26. Giles M. A. Electrolyte and Water Balance in Plasma and Urine of Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*) during Chronic Exposure to Cadmium. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1984. Vol. 41, no. 11. P. 1678–1685. <https://doi.org/10.1139/f84-206>.
27. Hart B. T., Davies S. H. R. Trace metal speciation in the freshwater and estuarine regions of the Yarra River, Victoria. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1981. Vol. 12, no. 4. P. 353–374. [https://doi.org/10.1016/s0302-3524\(81\)80001-1](https://doi.org/10.1016/s0302-3524(81)80001-1).
28. Hart B., Davies S. Trace metal speciation in three Victorian lakes. *Marine and Freshwater Research*. 1981. Vol. 32, no. 2. P. 175–189. <https://doi.org/10.1071/mf9810175>.
29. Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review / K. H. Hama Aziz et al. *RSC Advances*. 2023. Vol. 13, no. 26. P. 17595–17610. <https://doi.org/10.1039/d3ra00723e>
30. Hochachka P. W., Somero G. N. Biochemical Adaptation: Mechanism and Process in Physiological Evolution. Oxford University Press, USA, 2002. 478 p.
31. Jenkins J. A., Musgrove M., White S. J. O. Outlining Potential Biomarkers of Exposure and Effect to Critical Minerals: Nutritionally Essential Trace Elements and the Rare Earth Elements. *Toxics*. 2023. Vol. 11, no. 2. P. 188. <https://doi.org/10.3390/toxics11020188>.
32. Kumada H., Kimura S., Yokote M. Accumulation and biological effects of cadmium in rainbow trout. *Nippon Suisan Gakkaishi*. 1980. Vol. 46, no. 1. P. 97–103. <https://doi.org/10.2331/suisan.46.97>.
33. Martin M. H., Nriagu J. O. Cadmium in the Environment. Part I. Ecological Cycling. *The Journal of Ecology*. 1981. Vol. 69, no. 3. P. 1071. <https://doi.org/10.2307/2259663>.
34. Mc Donald D.G., Wood C.M. Branchial mechanisms of acclimation to metals in freshwater fish. *Fish Ecophysiology*. London. Chapman and Hall. 1993. P. 197–321.
35. Mc Geer J. C., Niyogi S., Smith D. S. Cadmium /Homeostasis and toxicology of non-essential metals. London: Waltham: San-Diego/ Academic Press. 2012. P. 298–348.
36. Mc Geer J. C., Niyogi S., Smith D. S. Cadmium Homeostasis and toxicology of non-essential metals. London: Waltham: San Diego. Academic Press. 2012. P. 125–184.
37. McNicol R. E., Scherer E. Behavioral responses of lake whitefish (*coregonus clupeaformis*) to cadmium during preference-avoidance testing. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1991. Vol. 10, no. 2. P. 225–234. [https://doi.org/10.1897/1552-8618\(1991\)10\[225:brolwc\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1897/1552-8618(1991)10[225:brolwc]2.0.co;2).
38. Moore J. W., Ramamoorthy S. Heavy Metals in Natural Waters. New York, NY : Springer New York, 1984. 270 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5210-8>.
39. Muramoto S. Effect of complexans (EDTA, NTA and DTPA) on the exposure to high concentrations of cadmium, copper, Zinc and lead. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 1980. Vol. 25, no. 1. P. 941–946. <https://doi.org/10.1007/bf01985635>.
40. Nriagu J., Wong H., Coker R. Particulate and dissolved trace metals in Lake Ontario. *Water Research*. 1981. Vol. 15, no. 1. P. 91–96. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(81\)90188-3](https://doi.org/10.1016/0043-1354(81)90188-3).
41. Okocha R. C. Adediji O. B. Overview of Cadmium Toxicity in Fish. *J. of Appleid Sci. Reseach*. 2011. № 7 (7). P. 1195–1207.
42. Paschoalini A. L., Bazzoli N. Heavy metals affecting Neotropical freshwater fish: A review of the last 10 years of research. *Aquatic Toxicology*. 2021. Vol. 237. P. 105906. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105906>.
43. Pickering W. F. Cadmium retention by claya and other soil or sediment components. In: Cadmium in the environment. Part I. Ecological cycling, New York. Wiley Interscience publ. 1980. P. 365–397.
44. Rainville D. P., Weber J. H. Complexing capacity of soil fulvic acid for Cu²⁺, Cd²⁺, Mn²⁺, Ni²⁺, and Zn²⁺ measured by dialysis titration: a model based on soil fulvic acid aggregation. *Canadian Journal of Chemistry*. 1982. Vol. 60, no. 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.1139/v82-001>.
45. Ramamoorthy S., Kushner D. J. Heavy Metal Binding Components of River Water. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 1975. Vol. 32, no. 10. P. 1755–1766. <https://doi.org/10.1139/f75-209>.
46. Reid S. D., McDonald D. G. Effects of Cadmium, Copper, and Low pH on Ion Fluxes in the Rainbow Trout, *Salmo gairdneri*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1988. Vol. 45, no. 2. P. 244–253. <https://doi.org/10.1139/f88-029>.
47. Response of rainbow trout transcriptome to model chemical contaminants / H. Koskinen et al. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2004. Vol. 320, no. 3. P. 745–753. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2004.06.024>.
48. Review of Cadmium Bioaccumulation in Fish Exposed to Cadmium / J.-W. Lee et al. *Toxics*. 2024. Vol. 13, no. 1. P. 7–23. <https://doi.org/10.3390/toxics13010007>.

49. Rombough P. J., Garside E. T. Disturbed ion balance in alevins of Atlantic salmon *Salmo salar* chronically exposed to sublethal concentrations of cadmium. *Canadian Journal of Zoology*. 1984. Vol. 62, no. 8. P. 1443–1450. <https://doi.org/10.1139/z84-207>.
50. Saar R. A., Weber J. H. Complexation of cadmium(II) with water- and soil-derived fulvic acids: effect of pH and fulvic acid concentration. *Canadian Journal of Chemistry*. 1979. Vol. 57, no. 11. P. 1263–1268. <https://doi.org/10.1139/v79-206>.
51. Slavek J., Pickering W. F. The effect of pH on the retention of Cu, Pb, Cd, and Zn by clay-fulvic acid mixtures. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1981. Vol. 16, no. 2. P. 209–221. <https://doi.org/10.1007/bf01046855>.
52. Steinberg C. Species of dissolved metals derived from oligotrophic hard water. *Water Research*. 1980. Vol. 14, no. 9. P. 1239–1250. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90182-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90182-7).
53. The effects of long-term cadmium exposure on the growth and survival of juvenile bull trout (*Salvelinus confluentus*) / J. A. Hansen et al. *Aquatic Toxicology*. 2002. Vol. 58, no. 3–4. P. 165–174. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(01\)00233-8](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(01)00233-8).
54. The effects of trace metal exposure on agonistic encounters in juvenile rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* / K. A. Sloman et al. *Aquatic Toxicology*. 2003. Vol. 63, no. 2. P. 187–196. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(02\)00176-5](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(02)00176-5).
55. Toxic Effects of Cadmium on Three Generations of Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*) / D. A. Benoit et al. *Transactions of the American Fisheries Society*. 1976. Vol. 105, no. 4. P. 550–560. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1976\)105%3C550:teocot%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1976)105%3C550:teocot%3E2.0.co;2).
56. Trace metal s in rivers speciation, transport and role of sediments / Mc Duffie B. et al. *Environ Health-X. Columbia. Mo*. 1976. P. 85–95.
57. Walsh D.F., Berger B.I., Bean J.R. Mercury, arsenic, lead, cadmium and selenium in fish. National Pesticide Monitoring Programe. *Pesticides Monitoring Journal*. 1977. 11. P. 5–34.
58. Wang W.-X., Rainbow P. S. Subcellular Partitioning and the Prediction of Cadmium Toxicity to Aquatic Organisms. *Environmental Chemistry*. 2006. Vol. 3, no. 6. P. 395–399. <https://doi.org/10.1071/en06055>.
59. Water Quality Degradation Due to Heavy Metal Contamination: Health Impacts and Eco-Friendly Approaches for Heavy Metal Remediation / P. Zhang et al. *Toxics*. 2023. Vol. 11, no. 10. P. 828. <https://doi.org/10.3390/toxics11100828>.
60. Weber W. J., Poselt H. S. Equilibrium models and precipitation reactions for cadmium (II), In: *Aqueous Environment Chemistry of metals*. Michigan: Ann Arbor Sci. 1974. 360 p.
61. Wright D. A. Heavy metals in animals from the north east coast. *Marine Pollution Bulletin*. 1976. Vol. 7, no. 2. P. 36–38. [https://doi.org/10.1016/0025-326x\(76\)90310-6](https://doi.org/10.1016/0025-326x(76)90310-6).

References

1. Hrytsyniak I. I., Yanovych L. O., Shvets T. M. *Ekotoksykologhiia lososevykh ryb*. Kyiv : Vydavnytstvo TOV «DIA». 2015. 472 s. [in Ukrainian]
2. Hrubinko V. V. Adaptivni stratehii toksykorezystentnosti do metaliv u hidrobiontiv. *Naukovi zapysky TNPU. Serii: Biologhiia*. 2017. No 2 (69). S. 129–162. [in Ukrainian]
3. Hrubinko V. V. Systemna otsinka metabolichnykh adaptatsiy u hidrobiontiv. *Naukovi zapysky TNPU. Serii: Biologhiia*. 2001. No 4 (15). S. 36–39. [in Ukrainian]
4. Lynnyk P. M., Iskra I. V. Kadmii v poverkhnevnykh vodakh: vmist, formy znakhodzhennia, toksychna diia. *Hidrobiol. zhurn*. 1997. No 6. S. 72–87. [in Ukrainian]
5. Romanenko V. D. *Osnovy hidroekologhi*. Kyiv : Oberehy, 2001. 728 s. [in Ukrainian]
6. A review on heavy metal-induced toxicity in fishes: Bioaccumulation, antioxidant defense system, histopathological manifestations, and transcriptional profiling of genes / M. Kumar et al. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2023. P. 127377. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2023.127377>.
7. Accumulation of heavy metals (Ni, Cu, Cd, Cr, Pb, Zn, Fe) in the soil in water and water collected from Tanda Dam Kohat / Nazir R. et al. *J. Pharm. Sci. Res*. 2015. Vol. 7 (3). P. 89–97.
8. Allen H. E. Studies of trace metals in aquatic environment using anodic stripping voltammetry. – In: *Modern analytical polarography. Workshop Manual by PAR Corporation*. New-Jersey. 1973. P. VIII. P. 1–14.
9. Allen H. E., Boonlayangoor C., Noll K. E. Changes in physicochemical forms of lead and cadmium added to freshwater. *Environment International*. 1982. Vol. 7, no. 5. P. 337–341. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(82\)90126-x](https://doi.org/10.1016/0160-4120(82)90126-x).
10. Aspects of the aquatic chemistry of cadmium and zinc in a heavy metal contaminated lake / B. K. Shephard et al. *Water Research*. 1980. Vol. 14, no. 8. P. 1061–1066. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90153-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90153-0).
11. Badsha K. S., Sainsbury M. Uptake of zinc, lead and cadmium by young whiting in the Severn Estuary. *Marine Pollution Bulletin*. 1977. Vol. 8, no. 7. P. 164–166. [https://doi.org/10.1016/0025-326x\(77\)90270-3](https://doi.org/10.1016/0025-326x(77)90270-3).

12. Cadmium accumulation, gill Cd binding, acclimation, and physiological effects during long term sublethal Cd exposure in rainbow trout / L. Hollis et al. *Aquatic Toxicology*. 1999. Vol. 46, no. 2. P. 101–119. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(98\)00118-0](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(98)00118-0).
13. Cadmium inhibits the electron transfer chain and induces Reactive Oxygen Species / Y. Wang et al. *Free Radical Biology and Medicine*. 2004. Vol. 36, no. 11. P. 1434–1443. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2004.03.010>.
14. Cadmium toxicity to rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* Walbaum and brown trout *Salmo trutta* L. over extended exposure periods / V. Brown et al. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 1994. Vol. 29, no. 1. P. 38–46. [https://doi.org/10.1016/0147-6513\(94\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0147-6513(94)90028-0).
15. Chowdhury M. J., McDonald D. G., Wood C. M. Gastrointestinal uptake and fate of cadmium in rainbow trout acclimated to sublethal dietary cadmium. *Aquatic Toxicology*. 2004. Vol. 69, no. 2. P. 149–163. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2004.05.002>.
16. Chowdhury M. J., Wood C. M. Renal function in the freshwater rainbow trout after dietary cadmium acclimation and waterborne cadmium challenge. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. 2007. Vol. 145, no. 3. P. 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2007.01.004>.
17. Ecological Biomarkers: Indicators of Ecotoxicological Effects. Taylor & Francis Group, 2012. 464 p.
18. Edgren M., Notter M. Cadmium uptake by fingerlings of perch (*Perca fluviatilis*) studied by Cd-115m at two different temperatures. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 1980. Vol. 24, no. 1. P. 647–651. <https://doi.org/10.1007/bf01608168>.
19. Effect of heavy metals on fish larvae deformities: A review / D. G. Sfakianakis et al. *Environmental Research*. 2015. Vol. 137. P. 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.014>.
20. Effects of chronic sublethal exposure to waterborne Cu, Cd or Zn in rainbow trout 2: tissue specific metal accumulation / J. C. McGeer et al. *Aquatic Toxicology*. 2000. Vol. 50, no. 3. P. 245–256. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(99\)00106-x](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(99)00106-x).
21. Effects of Subchronic Exposure to Cadmium Chloride on Endocrine and Metabolic Functions in Rainbow Trout *Oncorhynchus mykiss* / A. C. Ricard et al. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 1998. Vol. 34, no. 4. P. 377–381. <https://doi.org/10.1007/s002449900333>.
22. Farrah H., Pickering W. The effect of pH and ligands on the sorption of heavy metal ions by cellulose. *Australian Journal of Chemistry*. 1978. Vol. 31, no. 7. P. 1501–1509. <https://doi.org/10.1071/ch9781501>.
23. Farrah H., Pickering W. The sorption of lead and cadmium species by clay minerals. *Australian Journal of Chemistry*. 1977. Vol. 30, no. 7. P. 1417–1422. <https://doi.org/10.1071/ch9771417>.
24. Gardiner J. The chemistry of cadmium in natural water—I a study of cadmium complex formation using the cadmium specific-ion electrode. *Water Research*. 1974. Vol. 8, no. 1. P. 23–30. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(74\)90005-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(74)90005-0).
25. Giesy J. P. Cadmium interactions with naturally occurring organic ligands. In: Cadmium in the environment. Part I. Ecological cycling. New York. Wiley Interscience publ. 1980. P. 237–256.
26. Giles M. A. Electrolyte and Water Balance in Plasma and Urine of Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*) during Chronic Exposure to Cadmium. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1984. Vol. 41, no. 11. P. 1678–1685. <https://doi.org/10.1139/f84-206>.
27. Hart B. T., Davies S. H. R. Trace metal speciation in the freshwater and estuarine regions of the Yarra River, Victoria. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1981. Vol. 12, no. 4. P. 353–374. [https://doi.org/10.1016/s0302-3524\(81\)80001-1](https://doi.org/10.1016/s0302-3524(81)80001-1).
28. Hart B., Davies S. Trace metal speciation in three Victorian lakes. *Marine and Freshwater Research*. 1981. Vol. 32, no. 2. P. 175–189. <https://doi.org/10.1071/mf9810175>.
29. Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review / K. H. Hama Aziz et al. *RSC Advances*. 2023. Vol. 13, no. 26. P. 17595–17610. <https://doi.org/10.1039/d3ra00723e>.
30. Hochachka P. W., Somero G. N. Biochemical Adaptation: Mechanism and Process in Physiological Evolution. Oxford University Press, USA, 2002. 478 p.
31. Jenkins J. A., Musgrove M., White S. J. O. Outlining Potential Biomarkers of Exposure and Effect to Critical Minerals: Nutritionally Essential Trace Elements and the Rare Earth Elements. *Toxics*. 2023. Vol. 11, no. 2. P. 188. <https://doi.org/10.3390/toxics11020188>.
32. Kumada H., Kimura S., Yokote M. Accumulation and biological effects of cadmium in rainbow trout. *Nippon Suisan Gakkaishi*. 1980. Vol. 46, no. 1. P. 97–103. <https://doi.org/10.2331/suisan.46.97>.
33. Martin M. H., Nriagu J. O. Cadmium in the Environment. Part I. Ecological Cycling. *The Journal of Ecology*. 1981. Vol. 69, no. 3. P. 1071. <https://doi.org/10.2307/2259663>.
34. McDonald D. G., Wood C. M. Branchial mechanisms of acclimation to metals in freshwater fish. *Fish Ecophysiology*. London. Chapman and Hall. 1993. P. 197–321.

35. Mc Geer J. C., Niyogi S., Smith D. S. Cadmium /Homeostasis and toxicology of non-essential metals. London: Waltham: San-Diego/ Academic Press. 2012. P. 298–348.
36. Mc Geer J. C., Niyogi S., Smith D. S. Cadmium Homeostasis and toxicology of non-essential metals. London: Waltham: San Diego. Academic Press. 2012. P. 125–184.
37. McNicol R. E., Scherer E. Behavioral responses of lake whitefish (*coregonus clupeaformis*) to cadmium during preference-avoidance testing. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1991. Vol. 10, no. 2. P. 225–234. [https://doi.org/10.1897/1552-8618\(1991\)10\[225:brolwc\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1897/1552-8618(1991)10[225:brolwc]2.0.co;2).
38. Moore J. W., Ramamoorthy S. Heavy Metals in Natural Waters. New York, NY : Springer New York, 1984. 270 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5210-8>.
39. Muramoto S. Effect of complexans (EDTA, NTA and DTPA) on the exposure to high concentrations of cadmium, copper, Zinc and lead. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 1980. Vol. 25, no. 1. P. 941–946. <https://doi.org/10.1007/bf01985635>.
40. Nriagu J., Wong H., Coker R. Particulate and dissolved trace metals in Lake Ontario. *Water Research*. 1981. Vol. 15, no. 1. P. 91–96. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(81\)90188-3](https://doi.org/10.1016/0043-1354(81)90188-3).
41. Okocha R. C. Adedjeji O. B. Overview of Cadmium Toxicity in Fish. *J. of Appleid Sci. Reseach*. 2011. № 7 (7). P. 1195–1207.
42. Paschoalini A. L., Bazzoli N. Heavy metals affecting Neotropical freshwater fish: A review of the last 10 years of research. *Aquatic Toxicology*. 2021. Vol. 237. P. 105906. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105906>.
43. Pickering W. F. Cadmium retention by claya and other soil or sediment components. In: Cadmium in the environment. Part I. Ecological cycling, New York. Wiley Interscience publ. 1980. P. 365–397.
44. Rainville D. P., Weber J. H. Complexing capacity of soil fulvic acid for Cu²⁺, Cd²⁺, Mn²⁺, Ni²⁺, and Zn²⁺ measured by dialysis titration: a model based on soil fulvic acid aggregation. *Canadian Journal of Chemistry*. 1982. Vol. 60, no. 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.1139/v82-001>.
45. Ramamoorthy S., Kushner D. J. Heavy Metal Binding Components of River Water. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 1975. Vol. 32, no. 10. P. 1755–1766. <https://doi.org/10.1139/f75-209>.
46. Reid S. D., McDonald D. G. Effects of Cadmium, Copper, and Low pH on Ion Fluxes in the Rainbow Trout, *Salmo gairdneri*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1988. Vol. 45, no. 2. P. 244–253. <https://doi.org/10.1139/f88-029>.
47. Response of rainbow trout transcriptome to model chemical contaminants / H. Koskinen et al. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2004. Vol. 320, no. 3. P. 745–753. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2004.06.024>.
48. Review of Cadmium Bioaccumulation in Fish Exposed to Cadmium / J.-W. Lee et al. *Toxics*. 2024. Vol. 13, no. 1. P. 7–23. <https://doi.org/10.3390/toxics13010007>.
49. Rombough P. J., Garside E. T. Disturbed ion balance in alevins of Atlantic salmon *Salmo salar* chronically exposed to sublethal concentrations of cadmium. *Canadian Journal of Zoology*. 1984. Vol. 62, no. 8. P. 1443–1450. <https://doi.org/10.1139/z84-207>.
50. Saar R. A., Weber J. H. Complexation of cadmium(II) with water- and soil-derived fulvic acids: effect of pH and fulvic acid concentration. *Canadian Journal of Chemistry*. 1979. Vol. 57, no. 11. P. 1263–1268. <https://doi.org/10.1139/v79-206>.
51. Slavek J., Pickering W. F. The effect of pH on the retention of Cu, Pb, Cd, and Zn by clay-fulvic acid mixtures. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1981. Vol. 16, no. 2. P. 209–221. <https://doi.org/10.1007/bf01046855>.
52. Steinberg C. Species of dissolved metals derived from oligotrophic hard water. *Water Research*. 1980. Vol. 14, no. 9. P. 1239–1250. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90182-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90182-7).
53. The effects of long-term cadmium exposure on the growth and survival of juvenile bull trout (*Salvelinus confluentus*) / J. A. Hansen et al. *Aquatic Toxicology*. 2002. Vol. 58, no. 3–4. P. 165–174. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(01\)00233-8](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(01)00233-8).
54. The effects of trace metal exposure on agonistic encounters in juvenile rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* / K. A. Sloman et al. *Aquatic Toxicology*. 2003. Vol. 63, no. 2. P. 187–196. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(02\)00176-5](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(02)00176-5).
55. Toxic Effects of Cadmium on Three Generations of Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*) / D. A. Benoit et al. *Transactions of the American Fisheries Society*. 1976. Vol. 105, no. 4. P. 550–560. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1976\)105%3C550:teocot%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1976)105%3C550:teocot%3E2.0.co;2).
56. Trace metal s in rivers speciation, transport and role of sediments / Mc Duffie B. et al. Environ Health-X. Columbia. Mo. 1976. P. 85–95.
57. Walsh D.F., Berger B.I., Bean J.R. Mercury, arsenic, lead, cadmium and selenium in fish. National Pesticide Monitoring Programe. *Pesticides Monitoring Journal*. 1977. 11. P. 5–34.

58. Wang W.-X., Rainbow P. S. Subcellular Partitioning and the Prediction of Cadmium Toxicity to Aquatic Organisms. *Environmental Chemistry*. 2006. Vol. 3, no. 6. P. 395–399. <https://doi.org/10.1071/en06055>.
59. Water Quality Degradation Due to Heavy Metal Contamination: Health Impacts and Eco-Friendly Approaches for Heavy Metal Remediation / P. Zhang et al. *Toxics*. 2023. Vol. 11, no. 10. P. 828. <https://doi.org/10.3390/toxics11100828>.
60. Weber W. J., Poselt H. S. Equilibrium models and precipitation reactions for cadmium (II), In: *Aqueous Environment Chemistry of metals*. Michigan: Ann Arbor Sci. 1974. 360 p.
61. Wright D. A. Heavy metals in animals from the north east coast. *Marine Pollution Bulletin*. 1976. Vol. 7, no. 2. P. 36–38. [https://doi.org/10.1016/0025-326x\(76\)90310-6](https://doi.org/10.1016/0025-326x(76)90310-6).

¹B. M. Petrushka, ¹B. O. Ivanitskyi, ²S. B. Petrushka, ¹V. O. Khomenchuk, ¹V. Z. Kurant

¹Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

²Private Applied Educational Institution “Medical College”, Ukraine

CADMIUM IN AQUATIC ECOSYSTEMS: CONTENT, FORMS OF FINDING AND TOXICITY FOR FISH

Metals are among the most hazardous pollutants of the aquatic environment, as their technogenic migration exceeds natural levels. The significant danger posed by these toxicants to aquatic ecosystems stems from the fact that, unlike other chemicals of anthropogenic origin, metals do not decompose in natural conditions. Instead, they only change their physicochemical form within the environment. This is particularly characteristic of aquatic environments, where metal ions accumulate through leaching from soil surfaces, entering water via wastewater and industrial waste.

Metals, both essential (indispensable) and non-essential (toxic), become dangerous at elevated concentrations due to their ability to bioaccumulate, undergo biomagnification, and exhibit high biological activity in aquatic organisms. The accumulation of heavy metals in the bodies of aquatic animals can negatively affect protein, lipid, and carbohydrate metabolism, as well as enzyme function and membrane permeability. These disturbances can lead to weakened health, and problems with growth and development.

Cadmium is a typical toxicant. It belongs to the group of transitional, diffuse elements and is found as isomorphic impurities in many minerals. The content of cadmium in the Earth's crust, soil, and natural waters ranges from 10^{-5} to $10^{-6}\%$. Within the Earth's crust, cadmium is transported by groundwater along with other chalcophile elements. Its migration in the environment depends on the chemical form of its compounds and the pH of the environment. In alkaline soils, cadmium is less mobile than in acidic soils.

This review analyzes the content and forms of cadmium in natural waters, as well as its accumulation and toxicity to fish. It is noted that cadmium can exist in aquatic ecosystems in various forms. Additionally, the toxicity of cadmium is significantly influenced by the presence of suspended particles and dissolved organic compounds in water. It has been shown that the toxic effects of metal compounds depend not only on their concentration and chemical form but also on the physicochemical parameters of water and the physiological state of the fish. These factors substantially affect the bioavailability and rate of metal accumulation.

Keywords: fish, hydroecosystems, cadmium, toxicity.

Надійшла до редакції: 19.11.2025

Прийнята до друку: 11.12.2025

Опублікована: 30.12.2025