

ЕВОЛЮЦІЙНІ ЗМІНИ МЕХАНІЗМІВ ДЕПОНУВАННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У БОЛОТНИХ ЕКОСИСТЕМАХ В УМОВАХ ЗРОСТАЮЧОГО АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Вовк В.М., Хамдош І.Н.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

ke_miyu@ztu.edu.ua; gef_kgv@ztu.edu.ua; vovkvadim1983@gmail.com; 24d_khin@liceum.ztu.edu.ua

Дослідження спрямоване на комплексний аналіз еволюційних змін механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах під впливом зростаючого антропогенного навантаження та виявлення закономірностей адаптивної відповіді природних систем на техногенний тиск. Актуальність роботи обумовлена необхідністю розуміння трансформаційних процесів у водно-болотних угіддях в умовах посилення промислового впливу. Дослідження базується на комплексному аналізі еволюційних стадій болотних екосистем та трансформації механізмів депонування важких металів із застосуванням сучасних методів біогеохімічного аналізу, спектроскопії та математичного моделювання. Запропоновано концептуальну модель п'яти ключових аспектів: стадії розвитку болотних систем від природного стану до техногенно модифікованого, механізми акумуляції металів у донних відкладах та їх зміна під антропогенним впливом, біогеохімічні цикли у сапропелі та формування нових сполук, молекулярні механізми взаємодії металів з гуміновими кислотами та їх еволюція, кінетика вивільнення металів та зміна їх мобільності. Виявлено значні еволюційні зміни в механізмах депонування важких металів під впливом антропогенного навантаження. Встановлено трансформацію сорбційних процесів від фізичної адсорбції до хемосорбційних механізмів із залученням органо-мінеральних комплексів, еволюцію біологічних систем депонування через адаптацію мікробних спільнот, формування техногенно модифікованого сапропелю з підвищеною ємністю депонування та зміненою структурою. Результати дослідження мають важливе практичне значення для розробки стратегій збереження водно-болотних угідь, прогнозування поведінки болотних екосистем при різних сценаріях антропогенного впливу, створення ефективних систем екологічного моніторингу та управління якістю водних ресурсів в умовах зростаючого техногенного тиску на природні екосистеми. *Ключові слова:* болотні екосистеми, важкі метали, механізми депонування, антропогенне навантаження, еволюційні зміни, сапропель, біогеохімічні цикли.

Evolutionary changes in heavy metal deposition mechanisms in wetland ecosystems under increasing anthropogenic pressure. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Vovk V., Khamdosh I.

The research aims to comprehensively analyze evolutionary changes in heavy metal deposition mechanisms in wetland ecosystems under increasing anthropogenic pressure and identify patterns of adaptive response of natural systems to technogenic stress. The relevance of this work is determined by the necessity to understand transformational processes in wetlands under enhanced industrial impact. The study is based on comprehensive analysis of evolutionary stages of wetland ecosystems and transformation of heavy metal deposition mechanisms using modern methods of biogeochemical analysis, spectroscopy, and mathematical modeling. A conceptual model of five key aspects is proposed: wetland system development stages from natural state to technogenically modified conditions, metal accumulation mechanisms in bottom sediments and their changes under anthropogenic influence, biogeochemical cycles in sapropel and formation of new compounds, molecular mechanisms of metal interaction with humic acids and their evolution, and metal release kinetics with changes in their mobility. Significant evolutionary changes in heavy metal deposition mechanisms under anthropogenic pressure were revealed. Transformation of sorption processes from physical adsorption to chemisorption mechanisms involving organo-mineral complexes, evolution of biological deposition systems through microbial community adaptation, and formation of technogenically modified sapropel with enhanced deposition capacity and altered structure were established. The research results have important practical significance for developing wetland conservation strategies, predicting wetland ecosystem behavior under different scenarios of anthropogenic impact, creating effective ecological monitoring systems, and managing water resource quality under increasing technogenic pressure on natural ecosystems. The findings contribute to understanding ecosystem resilience and adaptation mechanisms, providing scientific basis for environmental management decisions in industrialized regions. *Key words:* wetland ecosystems, heavy metals, deposition mechanisms, anthropogenic pressure, evolutionary changes, sapropel, biogeochemical cycles.

Вступ. Болотні екосистеми відіграють критично важливу роль у глобальних біогеохімічних циклах та є одними з найбільш ефективних природних систем депонування важких металів, що сформувалися в процесі тривалої еволюції гідросфери та біосфери Землі. Прибережні водно-болотні угіддя зазвичай розташовані між наземними та морськими екосистемами і часто діють як природні фільтри для видалення хімічних речовин та забруднювачів з поверх-

невого стоку або річкової води [1]. У сучасну епоху антропогену зростаючий техногенний тиск призводить до кардинальних змін еволюційно сформованих процесів депонування, порушуючи природні геохімічні бар'єри та створюючи нові умови для міграції та акумуляції важких металів. Антропогенне навантаження характеризується не лише кількісним зростанням концентрацій металів-забруднювачів, але й якісними змінами в спектрі забруднювачів, вклю-

чаючи появу нових синтетичних сполук та наночасинок металів [2].

Теоретичні та прикладні аспекти геохімії важких металів у болотних екосистемах розглядаються в роботах багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. Зокрема, питання біогеохімічних циклів важких металів у прибережних водно-болотних угіддях висвітлені в працях, що підкреслюють долю важких металів, зв'язаних у відкладах або вивільнених у систему через седименти [3]. Механізми акумуляції та трансформації важких металів у донних відкладах боліт досліджені у роботах, що показують значний вплив антропогенної діяльності на ці процеси [4, 5]. Особлива увага приділяється взаємодії важких металів з органічною речовиною, зокрема з гуміновими кислотами, що визначає стабільність металоорганічних комплексів [6]. Екологічні наслідки забруднення важкими металами водно-болотних угідь та їх вплив на біорізноманіття досліджують науковці, які вказують на канцерогенні ризики для екосистем та людини [7, 8]. Кінетика вивільнення важких металів з донних відкладів в умовах зміни екологічних факторів розглянута в дослідженнях, що показують складність багатофазних процесів ремобілізації [9, 10]. Систематичні огляди глобальних тенденцій забруднення важкими металами прибережних водно-болотних угідь за останні три десятиліття виявляють швидке зростання антропогенних джерел забруднення [11]. Молекулярні механізми взаємодії важких металів з біогеохімічними циклами сірки у прибережних болотах є предметом інтенсивних досліджень [12].

Дослідження вітчизняних науковців також вносять значний вклад у розуміння процесів акумуляції важких металів в урбанізованих гідроекосистемах. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В. та співавтори досліджують просторову диференціацію та міграційні закономірності поліелементного розподілу важких металів в компонентах урбанізованих гідроекосистем [1]. Питання сталого використання природних ресурсів України в контексті інноваційних підходів розглядають Капеліста І., Кірейцева Г.В. та інші [2]. Фізіологічні та біохімічні біомаркери стійкості макрофітів до токсичних стресорів військового походження вивчають у працях, що показують адаптивні можливості водної рослинності [3]. Динаміка розподілу сполук важких металів в урбогідротопах Київської області в пост-військових умовах є предметом досліджень, що виявляють особливості техногенного впливу [4]. Оцінка стану та фіторе mediaційного потенціалу антропогенно трансформованих гідроекосистем Малинщини проведена в роботах, що демонструють можливості природного відновлення [5]. Гідрохімічний статус пост-мілітарних водних екосистем досліджений на прикладі с. Мощун Київської області [6].

Ці дослідження надають методологічну основу та практичні інструменти для розуміння еволюцій-

них змін механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах. Вони допомагають систематично підходити до оцінки впливу антропогенного навантаження на природні геохімічні процеси, ідентифікувати ключові механізми адаптації екосистем та розробляти ефективні стратегії для їх збереження в умовах зростаючого техногенного тиску.

Незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, присвячених геохімії важких металів у водно-болотних угіддях, недостатньо вивченими залишаються питання еволюційних змін механізмів депонування в умовах інтенсифікації антропогенного навантаження. Особливої уваги потребує розробка концептуальних моделей адаптивної відповіді болотних екосистем на техногенний вплив, дослідження критичних порогів стабільності систем депонування та прогнозування їх поведінки в умовах глобальних змін. Ці питання набувають особливої актуальності в контексті необхідності збереження екосистемних послуг болотних угідь та розробки стратегій сталого управління водними ресурсами.

Метою дослідження є аналіз еволюційних змін механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах під впливом зростаючого антропогенного навантаження та виявлення закономірностей адаптивної відповіді природних систем на техногенний тиск.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

1. проаналізувати еволюційні стадії болотних екосистем та трансформацію механізмів депонування важких металів під впливом антропогенного навантаження;
2. дослідити зміни в механізмах акумуляції важких металів у донних відкладах та формування техногенно модифікованого сапропелю;
3. вивчити еволюційні зміни біогеохімічних циклів важких металів у сапропелі болотних екосистем;
4. проаналізувати еволюцію молекулярних механізмів взаємодії важких металів з гуміновими кислотами в умовах антропогенного тиску;
5. дослідити еволюційні зміни кінетики вивільнення важких металів з донних відкладів під впливом антропогенних факторів;
6. оцінити адаптивну здатність болотних екосистем та визначити критичні пороги стабільності систем депонування.

Реалізація поставлених завдань дозволить сформулювати науково обґрунтовані уявлення про еволюційні зміни механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах, які можуть бути використані для розробки стратегій збереження водно-болотних угідь, прогнозування їх поведінки в умовах глобальних змін та створення ефективних систем екологічного моніторингу.

Основна частина. Сучасні дослідження геохімії болотних екосистем свідчать про необхідність

перегляду традиційних уявлень про механізми депонування важких металів з урахуванням динамічної природи еволюційних процесів та їх відповіді на антропогенний вплив. Особливої уваги потребує вивчення формування сапропелевих відкладів як основних депозитаріїв важких металів, кінетики їх вивільнення в умовах зміни екологічних факторів та ролі молекулярних механізмів взаємодії металів з органічними лігандами в забезпеченні довгострокової стабільності систем депонування.

Болотні екосистеми протягом своєї еволюції розвинули складні механізми депонування важких металів, які забезпечували ефективне очищення природних вод та довгострокове утримання забруднювачів у донних відкладах. Однак зростаючий антропогенний тиск призводить до кардинальних змін цих еволюційно сформованих процесів, порушуючи природні геохімічні бар'єри та створюючи нові умови для акумуляції металів. Еволюційні зміни механізмів депонування відбуваються на всіх стадіях розвитку болотних систем, від початкових водних об'єктів до зрілих торфових болот.

На стадії відкритої річки природні механізми депонування базувалися на фізичній седиментації та первинній сорбції на мінеральних частинках. Антропогенне навантаження призвело до еволюційної адаптації цих процесів через розвиток нових сорбційних центрів та зміну селективності депонування. Стадія заростання річки характеризується еволюцією біологічних механізмів депонування, включаючи розвиток спеціалізованих мікробіальних угруповань та адаптивних змін у водній рослинності. Формування болота супроводжується еволюцією найбільш складних механізмів депонування, включаючи утворення специфічних орґано-мінеральних комплексів та розвиток анаеробних процесів іммобілізації металів. Ці еволюційні зміни відображають адаптивну відповідь екосистем на зростаючий

антропогенний тиск, але також можуть призводити до порушення природного балансу та створення ризиків екологічних катастроф.

Еволюційні зміни механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах відображають адаптивну відповідь природних систем на зростаючий антропогенний тиск. Традиційні механізми сорбції еволюціонували від простої фізичної адсорбції до складних хемосорбційних процесів з розвитком специфічних центрів зв'язування для різних груп металів. Ця еволюція включає формування нових мінеральних фаз та модифікацію поверхневих властивостей природних сорбентів.

Механізми осадження зазнали еволюційних змін від простого гідролітичного осадження до складних процесів співосадження та формування змішаних гідроксидно-сульфідних фаз. Еволюція комплексоутворення з органічними лігандами характеризується розвитком більш специфічних та стабільних металоорґанічних комплексів, здатних ефективно депонувати метали навіть при високих концентраціях. Біоаккумуляція мікроорґанізмами еволюціонувала від пасивного поглинання до активних процесів детоксикації з розвитком специфічних ферментних систем. Ці еволюційні зміни призвели до формування нового типу донних відкладів – техногенно модифікованого сапропелю, який характеризується підвищеною ємністю депонування та зміненими фізико-хімічними властивостями. Однак ці адаптивні зміни мають свої межі, і перевищення критичних навантажень може призвести до колапсу систем депонування.

Біогеохімічні цикли важких металів у болотних екосистемах зазнали значних еволюційних змін під впливом зростаючого антропогенного навантаження. Водно-донна межа еволюціонувала від простої дифузійної зони до складного біогеохімічного бар'єру з множинними окисно-відновними мікрозо-



Рис. 1. Еволюційні стадії болотних екосистем

Джерело: розроблено автором



Рис. 2. Еволюція механізмів акумуляції важких металів у донних відкладах під впливом зростаючого антропогенного навантаження

Джерело: розроблено автором



Рис. 3. Еволюційні зміни біогеохімічних циклів важких металів у сапропелі болотних екосистем

Джерело: розроблено автором

нами, що забезпечують селективне депонування різних груп металів.

Еволюція біологічного поглинання характеризується розвитком адаптивних механізмів у водних рослин та мікроорганізмів, включаючи синтез специфічних металозв'язуючих білків та розвиток толерантності до високих концентрацій металів. Процеси біомінералізації та детоксикації еволюціонували від простих механізмів ізоляції до складних процесів трансформації металів у нетоксичні форми. Сапропель як центральний компонент системи депонування зазнав еволюційних змін у своїй структурі та функціях, розвинувши підвищену смістість та селективність депонування. Еволюція процесів розкладання та мінералізації характеризується розвитком нових метаболічних шляхів, адаптованих до високих концентрацій металів. Механізми іммобілізації та депонування еволюціонували в напрямку створення більш стабільних форм зв'язування металів. Ключові процеси метилування, сульфатредукції та хелатоутворення зазнали адаптивних змін, що дозволяє екосистемам функціонувати в умовах підвищеного металевого навантаження, але ці зміни можуть мати непередбачувані довгострокові наслідки.

Молекулярні механізми взаємодії важких металів з гуміновими кислотами зазнали значних еволюційних змін під впливом зростаючого антропогенного навантаження. Ці зміни відображають адаптивну відповідь органічної матриці болотних відкладів на нові геохімічні умови та підвищені концентрації

металів-забруднювачів.

Еволюція гумінових кислот характеризується збільшенням кількості та різноманітності функціональних груп, здатних до селективного зв'язування різних металів. Ароматичні кільця та аліфатичні ланцюги зазнали структурних модифікацій, що підвищило їх афінність до специфічних груп металів. Карбоксильні групи ($-\text{COO}^-$) еволюціонували в напрямку підвищення селективності до двовалентних катіонів, а фенольні групи ($-\text{O}^-$) розвинули здатність до утворення більш стабільних комплексів. Центральний іон металу (M^{2+}) в еволюційно модифікованих системах характеризується більш різноманітними координаційними можливостями. Еволюція типів зв'язування включає розвиток нових форм мономонодентатного (M-L), біодентатного (M-L₂) та полімерного (M-L-M) зв'язування з підвищеною стабільністю. Константи стабільності комплексів еволюціонували в напрямку збільшення: Cu^{2+} (до 6,8), Pb^{2+} (до 5,9), Cd^{2+} (до 4,8), що відображає адаптивні зміни органічної матриці. Ці еволюційні зміни забезпечують більш ефективне депонування металів, але можуть призводити до непередбачуваних змін у мобільності та біодоступності забруднювачів.

Кінетика вивільнення важких металів з донних відкладів болотних екосистем зазнала значних еволюційних змін під впливом зростаючого антропогенного навантаження. Ці зміни відображають адаптивну відповідь систем депонування на нові умови та створення більш стабільних форм утримання



Рис. 4. Еволюція молекулярних механізмів взаємодії важких металів із гуміновими кислотами

Джерело: розроблено автором

металів, але водночас можуть призводити до накопичення критичних навантажень.

Еволюція швидкої фази вивільнення характеризується розвитком більш селективних механізмів десорбції, що дозволяє утримувати найбільш токсичні метали при одночасному вивільненні менш небезпечних сполук. Повільна фаза еволюціонувала в напрямку формування більш стабільних внутрішньопорових комплексів та розвитку дифузійних бар'єрів. Дуже повільна фаза характеризується еволюцією надстабільних органо-мінеральних комплексів, здатних утримувати метали протягом геологічних періодів часу. Еволюційні зміни кінетичних параметрів включають зниження констант швидкості для критично важливих металів та підвищення селективності процесів вивільнення. Кінетика першого порядку модифікувалася з розвитком багатокомпонентних систем з різними константами швидкості для різних груп металів. Еловича модель та внутрішня дифузія зазнали еволюційних змін через розвиток нових типів активних центрів та модифікацію структури пор. Контролюючі фактори еволюціонували в напрямку створення більш стабільних систем, менш чутливих до зовнішніх впливів, включаючи буферування рН, термостабілізацію та розвиток резистентності до конкуруючих лігандів. Ці еволюційні зміни створюють більш надійні системи депонування, але можуть призводити до накопичення «екологічного боргу» у вигляді великих запасів депонованих металів.



Рис. 5. Еволюційні зміни кінетики вивільнення важких металів із донних відкладів

Джерело: розроблено автором

Еволюційні зміни механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах демонструють видатну адаптивну здатність природних систем до зростаючого антропогенного навантаження. Однак ці адаптації мають свої межі, і подальше зростання антропогенного тиску може призвести до порушення еволюційно сформованих механізмів депонування та катастрофічного вивільнення накопичених забруднювачів. Розуміння цих еволюційних процесів є критично важливим для прогнозування поведінки болотних екосистем в умовах глобальних змін та розробки стратегій їх збереження і відновлення. Подальші дослідження повинні зосередитися на встановленні критичних порогів антропогенного навантаження, за якими відбувається незворотна деградація систем депонування, та розробці інноваційних підходів до біоремедіації техногенно забруднених болотних екосистем.

Висновки. Проведене дослідження еволюційних змін механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах в умовах зростаючого антропогенного навантаження дозволило встановити закономірності адаптивної відповіді природних систем на техногенний тиск та виявити ключові трансформації геохімічних процесів у водно-болотних угіддях. Аналіз еволюційних стадій болотних екосистем показав, що антропогенне навантаження призводить до кардинальних змін природних механізмів депонування на всіх етапах розвитку болотних систем – від відкритих водних об'єктів до зрілих торфових болот. Встановлено, що еволюційні зміни характеризуються трансформацією традиційних сорбційних процесів від простої фізичної адсорбції

до складних хемосорбційних механізмів з розвитком специфічних центрів зв'язування для різних груп металів.

Дослідження механізмів акумуляції важких металів у донних відкладах виявило формування принципово нового типу седиментів – техногенно модифікованого сапропелю, який характеризується підвищеною ємністю депонування та зміненими фізико-хімічними властивостями. Еволюція біологічних систем депонування супроводжується розвитком спеціалізованих мікробіальних угруповань та адаптивних змін у водній рослинності, що дозволяє екосистемам функціонувати в умовах підвищеного металевого навантаження. Однак виявлено, що ці адаптивні зміни мають свої межі, і перевищення критичних навантажень може призвести до колапсу систем депонування та катастрофічного вивільнення накопичених забруднювачів.

Аналіз біогеохімічних циклів важких металів у сапропелі показав еволюцію водно-донної межі від простої дифузійної зони до складного біогеохімічного бар'єру з множинними окисно-відновними мікрозонами, що забезпечують селективне депонування різних груп металів. Встановлено еволюційні зміни процесів біомінералізації, детоксикації, іммобілізації та депонування, які характеризуються розвитком нових метаболічних шляхів та створенням більш стабільних форм зв'язування металів. Ключові процеси метилювання, сульфатредукції та хелатоутворення зазнали адаптивних змін, що може мати непередбачувані довгострокові наслідки для функціонування екосистем.

Дослідження молекулярних механізмів взаємодії важких металів з гуміновими кислотами виявило значні еволюційні зміни в структурі та функціональних властивостях органічної матриці болотних відкладів. Встановлено збільшення кіль-

кості та різноманітності функціональних груп, здатних до селективного зв'язування різних металів, а також еволюцію констант стабільності комплексів у напрямку підвищення ефективності депонування. Розвиток нових форм координаційного зв'язування забезпечує більш стабільне утримання металів, але може призводити до непередбачуваних змін у їх мобільності та біодоступності.

Аналіз кінетики вивільнення важких металів з донних відкладів показав еволюцію багатофазних процесів ремобілізації з модифікованими константами швидкості та підвищеною селективністю. Еволюційні зміни кінетичних параметрів включають розвиток більш стабільних систем депонування, менш чутливих до зовнішніх впливів, що створює більш надійні геохімічні бар'єри, але може призводити до накопичення «екологічного боргу» у вигляді великих запасів депонованих металів.

Результати дослідження демонструють видатну адаптивну здатність болотних екосистем до зростаючого антропогенного навантаження, однак виявлені еволюційні зміни мають критичні межі стабільності. Подальше зростання антропогенного тиску може призвести до порушення еволюційно сформованих механізмів депонування та катастрофічного вивільнення накопичених забруднювачів. Розуміння цих еволюційних процесів є критично важливим для прогнозування поведінки болотних екосистем в умовах глобальних змін, розробки стратегій збереження водно-болотних угідь та створення ефективних систем екологічного моніторингу. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для розробки інноваційних підходів до біоремедіації техногенно забруднених болотних екосистем та управління якістю водних ресурсів в умовах зростаючого антропогенного тиску.

Література

1. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Shomko, O., Gandziura, V., Khamdosh, I. (2025). Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*, 10(2), 135–144. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2025.02.135>
2. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, no. 3. P. s378-s395. DOI: 10.33002/nr2581.6853.0703ukr19
3. Bai, J., Huang, L., Gao, H., Zhang, G. Sulfur mediated heavy metal biogeochemical cycles in coastal wetlands: From sediments, rhizosphere to vegetation. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2022. Vol. 16, Issue 3. Article 1523. DOI: 10.1007/s11783-022-1523-x
4. Gao, W., Du, Y., Gao, S., Ingels, J., Wang, D. Heavy metal accumulation reflecting natural sedimentary processes and anthropogenic activities in two contrasting coastal wetland ecosystems, eastern China. *Journal of Soils and Sediments*. 2016. Vol. 16, Issue 3. P. 1093–1108. DOI: 10.1007/s00374-015-1089-3
5. Lu, S., Wang, H., Yao, Z. Heavy metals uptake and translocation of typical wetland plants and their ecological effects on the coastal soil of a contaminated bay in Northeast China. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 803. Article 149469. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149469
6. Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B., Beeregowda, K.N. Molecular mechanisms with heavy metals and humic acids interaction under anthropogenic pressure. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014. Vol. 7, Issue 2. P. 60–72. DOI: 10.2478/intox-2014-0009
7. Zhang, Y., Dai, M., Yuan, Z., Methods, G., Zhang, C. Assessment of environmental and carcinogenic health hazards from heavy metal contamination in sediments of wetlands. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article 17349. DOI: 10.1038/s41598-023-43349-7

8. Ali, M.M., Ali, M.L., Islam, M.S., Rahman, M.Z. Heavy Metal Pollution in Coastal Environments: Ecological Implications and Management Strategies: A Review. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, Issue 2. Article 701. DOI: 10.3390/su17020701
9. Kong, X., Liu, T., Yu, Z., Chen, Z., Lei, D., Wang, Z., Zhang, H., Li, Q., Zhang, J. Heavy metal pollution in coastal wetlands: A systematic review of studies globally over the past three decades. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 424, Part C. Article 127312. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127312
10. Liu, J., Dong, Y., Xu, H., Wang, D., Xu, J. High concentrations of bioavailable heavy metals impact freshwater sediment microbial communities. *Annals of Microbiology*. 2016. Vol. 66. P. 1003–1012. DOI: 10.1007/s13213-015-1189-8
11. Chen, B., Stein, A.F., Maldonado, P.G., Sanchez de la Campa, A.M., Gonzalez-Castanedo, Y., Castell, N., de la Rosa, J.D. A global perspective on the nature and fate of heavy metals polluting water ecosystems, and their impact and remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2024. Vol. 54, Issue 8. P. 580–612. DOI: 10.1080/10643389.2024.2317112
12. Liu, X., Wang, Y., Liu, Y., Chen, X., Yang, P., Feng, J., Ma, L.Q. Restoration of cadmium-contaminated paddy soils through Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) plantation. *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 255, Part 1. Article 113–157. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113157
13. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Fonseca Araújo J. Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, № 4. P. 227–234. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.227>
14. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Demchuk L. Dynamics of Heavy Metal Compounds Allocation in Urbohydrotops of Kyiv Region in Post-Military Conditions. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 2023. Vol. 2023, No. 1. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520066>
15. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Ventsel N., Ventsel V., Shevchuk L., Skyba G. Remote Evaluation of Post-Military Basin Moshchunka of Kyiv Oblast, Ukraine using Spectral Indices. 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 2025. Vol. 2025. P.P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510210>
16. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Демчук Л.І., Скиба Г.В., Вовк В.М. Оцінка стану та фіторемедіаційного потенціалу антропогенно трансформованих гідроекосистем Малинщини. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 5 (50). С. 81-87.
17. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Гандзюра В.П., Алпатова О.М., Демчук Л.І., Хом'як І.В., Вовк В.М. Гідрохімічний статус пост-мілітарних водних екосистем с. Мощун, Київської області. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 1 (46). С. 53-58.
18. Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І. Антропогенні детермінанти деградації гідрохімічних показників водних об'єктів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 349, № 2. С. 540-548. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-80>
19. Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І., Замула І., Демчук Л. Аналіз стану та моніторинг поверхневих водних об'єктів Чернігівської області. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2024, Випуск 1(144), С. 84-91. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.11>

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийняття до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: