

УДК 546.3-026.54-027.285:502.51(28):504.4](045)

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-14>

Світлана СОВГІРА

доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0002-8742-7773

Олена КОЧУБЕЙ

доктор філософії, викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0002-5047-6694

Наталія ДУШЕЧКІНА

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0002-4203-7122

Бібліографічний опис статті: Совгіра, С., Кочубей, О., Душечкіна, Н. (2025). Глобальні наслідки накопичення важких металів у прісноводних екосистемах. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 112–117, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-14>

ГЛОБАЛЬНІ НАСЛІДКИ НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ПРІСНОВОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

У статті розглянуто глобальну екологічну проблему накопичення важких металів у прісноводних екосистемах. Проаналізовано основні джерела надходження неорганічних забруднювачів у водойми, серед яких провідну роль відіграють промислові скиди, агрохімічний стік, міське водовідведення та атмосферне випадіння. Описано хімічні форми існування важких металів у водному середовищі, їхню міграцію, біодоступність та здатність до біоаккумуляції й біомагніфікації. Розкрито токсичну дію кадмію, свинцю, ртуті, міді, цинку, нікелю на водні організми, що проявляється на клітинному, фізіологічному та популяційному рівнях, призводячи до порушення функціонування біоценозів і зниження стійкості екосистем.

Наведено конкретні приклади забруднення річок Саксагань, Інгулець, Супій, Дністер, де зафіксовано перевищення гранично допустимих концентрацій металів у воді, донних відкладах і тканинах риби. Висвітлено випадки токсичного забруднення водойм у Китаї, Індії, США та інших країнах, що підтверджує глобальний характер проблеми. Проаналізовано сучасні методи дослідження та моніторингу, включаючи атомно-абсорбційну спектrophотометрію, біоіндикацію та геоінформаційне картування. Акцентовано на необхідності комплексного підходу до мінімізації екологічних наслідків, який передбачає поєднання технологічних рішень, нормативного регулювання, екосистемного управління та міжсекторальної співпраці.

Окреслено перспективи подальших досліджень, зокрема в напрямі розробки цифрових систем моніторингу, адаптації міжнародних екологічних стандартів та впровадження інноваційних засобів очищення водного середовища.

Ключові слова: важкі метали, прісноводні екосистеми, токсичність, біоаккумуляція, донні відклади, неорганічне забруднення, екологічна безпека, моніторинг, біоіндикація, водні ресурси.

Svitlana SOVHIRA

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor at the Department of Chemistry and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID: 0000-0002-8742-7773

Olena KOCHUBEI

Doctor of Philosophy, Lecturer at the Department of Chemistry and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID: 0000-0002-5047-6694

Nataliia DUSHECHKINA

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, and Ecology Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID: 0000-0002-4203-7122

To cite this article: Sovhira, S., Kochubei, O., Dushechkina, N. (2025). Hlobalni naslidky nakopychennia vazhkykh metaliv u prysnovodnykh ekosystemakh [Global impacts of heavy metals accumulation in freshwater ecosystems]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 112–117, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-14>

GLOBAL IMPACTS OF HEAVY METALS ACCUMULATION IN FRESHWATER ECOSYSTEMS

The article considers the global environmental problem of the accumulation of heavy metals in freshwater ecosystems. The main sources of inorganic pollutants entering water bodies are analyzed, among which industrial discharges, agrochemical runoff, urban drainage and atmospheric precipitation play a leading role. The chemical forms of the existence of heavy metals in the aquatic environment, their migration, bioavailability and ability to bioaccumulate and biomagnification are described. The toxic effect of cadmium, lead, mercury, copper, zinc, nickel on aquatic organisms is revealed, which manifests itself at the cellular, physiological and population levels, leading to disruption of the functioning of biocenoses and a decrease in the stability of ecosystems.

Specific examples of pollution of the Saksagan, Ingulets, Supii, Dniester rivers are given, where exceeding the maximum permissible concentrations of metals in water, bottom sediments and fish tissues was recorded. Cases of toxic pollution of water bodies in China, India, the USA and other countries are highlighted, confirming the global nature of the problem. Modern methods of research and monitoring are analyzed, including atomic absorption spectrophotometry, bioindication and geoinformation mapping. The need for an integrated approach to minimizing environmental impacts is emphasized, which involves a combination of technological solutions, regulatory regulation, ecosystem management and intersectoral cooperation.

Prospects for further research are outlined, in particular in the direction of developing digital monitoring systems, adapting international environmental standards and introducing innovative means of purifying the aquatic environment.

Key words: heavy metals, freshwater ecosystems, toxicity, bioaccumulation, bottom sediments, inorganic pollution, environmental safety, monitoring, bioindication, water resources.

Актуальність проблеми. Накопичення важких металів у прісноводних екосистемах є однією з найгостріших глобальних екологічних загроз сьогодення. Ці неорганічні забруднювачі мають здатність до тривалого збереження у водному середовищі, осадових відкладах і тканинах живих організмів, що створює передумови для їх довготривалого впливу на екосистемні процеси. Важкі метали, зокрема ртуть, кадмій, свинець, мідь, цинк та нікель, виявляють високу токсичність навіть у незначних концентраціях, порушуючи фізіолого-біохімічні функції водної флори та фауни, спричиняючи біоаккумуляцію та біомагніфікацію в харчових ланцюгах.

Особливої актуальності проблема набуває в умовах посилення антропогенного тиску – індустріалізації, інтенсивного сільськогосподарського виробництва, урбанізації та зміни клімату. Прісноводні ресурси дедалі більше зазнають техногенного навантаження,

що ставить під загрозу не лише збереження біорізноманіття, а й безпеку питного водопостачання та здоров'я людини. Крім того, глобальний характер циркуляції важких металів у біосфері потребує міжнародного підходу до моніторингу, регулювання і впровадження технологій очищення води.

Наукове дослідження закономірностей поширення, нагромадження та наслідків присутності важких металів у прісноводних екосистемах є надзвичайно важливим для розробки стратегії охорони довкілля, формування екологічної політики та впровадження практичних заходів з реабілітації водних об'єктів. Системний аналіз цієї проблеми дозволяє створити інтегровану екологічну модель оцінки ризиків і передбачення довгострокових наслідків забруднення, що зумовлює необхідність міждисциплінарного підходу – з урахуванням хімічних, біологічних, геоекологічних та соціальних аспектів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Останні наукові дослідження підкреслюють серйозність проблеми накопичення важких металів у прісноводних екосистемах та їхній вплив на біоту і здоров'я людини. Зокрема, комплексний огляд токсичних важких металів у водних системах акцентує на глобальному характері цього забруднення та його загрози для водних екосистем і людства.

У дослідженні, опублікованому в журналі *Environmental Toxicology and Chemistry*, розглядається вплив важких металів на водні організми та оцінюється ризик для людського здоров'я, підкреслюючи необхідність постійного моніторингу та управління забрудненням для забезпечення сталого розвитку морських екосистем.

Окремі дослідження фокусуються на конкретних регіонах. Наприклад, аналіз забруднення річки Стир в Україні виявив значні концентрації важких металів, зокрема цинку, кадмію та свинцю, що пов'язано з діяльністю Рівненської АЕС. Це підкреслює важливість регіональних досліджень для розуміння локальних джерел забруднення та їхнього впливу на екосистеми.

Крім того, дослідження, проведене в Пакистані, виявило накопичення важких металів у тканинах риб та птахів у водосховищі Мангла, що свідчить про потенційні ризики для харчового ланцюга та необхідність контролю за якістю води.

Важливо зазначити, що зміна клімату також впливає на мобільність важких металів у водних системах. Дослідження в гірських річках Колорадо показало, що підвищення температури сприяє вивільненню токсичних металів, таких як мідь і цинк, через танення підземного льоду.

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують, що накопичення важких металів у прісноводних екосистемах є багатогранною проблемою, що вимагає комплексного підходу, включаючи постійний моніторинг, розробку стратегій зменшення забруднення та врахування впливу зміни клімату на поведінку цих забруднювачів.

Мета дослідження – системний аналіз глобальних екологічних наслідків накопичення важких металів у прісноводних екосистемах, зокрема їхнього впливу на біоту, якість водного

середовища та здоров'я людини, а також визначення основних джерел забруднення, механізмів розповсюдження та способів мінімізації негативного впливу з урахуванням сучасних наукових підходів і міжнародного досвіду.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Важкі метали є одними з найпоширеніших і найнебезпечніших забруднювачів у прісноводних екосистемах, що становлять довготривалу загрозу для живих організмів, якості водних ресурсів, функціонування біоценозів та безпеки людського здоров'я. Їх стійкість до розкладу, здатність до накопичення, висока токсичність навіть у слідових концентраціях і широкий спектр джерел надходження зумовлюють перехід цієї проблеми з категорії локальних до глобальних (Zhang, Wang & Shi, 2021). Особливої актуальності вона набуває в умовах зростаючого техногенного тиску, деградації природних бар'єрів, порушення самоочисних механізмів водойм і зниження екологічної стійкості екосистем (USEPA, 2021).

До найпоширеніших і водночас найтоксичніших елементів, що накопичуються у водоймах, належать свинець, кадмій, ртуть, мідь, цинк, хром, нікель, ванадій, миш'як. Вони надходять у водне середовище через безпосередні викиди з промислових підприємств, шахт, металургійних комбінатів, разом зі зливовими та побутовими стоками, агрохімічним стоком із сільськогосподарських угідь, просочуванням з полігонів та звалищ (Романенко, Коваленко & Громова, 2021), а також внаслідок атмосферного перенесення й осадження пилу та аерозолів. Відсутність сучасних систем очищення на багатьох підприємствах, низький рівень екологічного контролю, корозія трубопроводів та несанкціоновані скиди лише поглиблюють ситуацію (Kim, Park & Lee, 2023).

У водоймах важкі метали перебувають у кількох формах: іонній, колоїдній, в комплексах з органічними речовинами або в складі зважених часток. У донних відкладах вони можуть утворювати малорозчинні сполуки, які зберігаються десятиліттями й становлять вторинне джерело забруднення. За зміни фізико-хімічних умов – коливань рН, температури, вмісту кисню – можливе повторне вивільнення металів у воду (Gumenyuk, Melnychuk & Rybak, 2022), особливо під час паводків, пересихання чи евтрофікації. Саме цей процес часто

спостерігається в умовах змін клімату, коли погодні аномалії сприяють різкому порушенню гідрохімічної рівноваги (Kim, Park & Lee, 2023).

Біологічний ефект важких металів проявляється через їх вплив на клітинні структури, генетичний матеріал, ферментні системи, гормональний баланс та імунітет. У риб спостерігається ураження зябер, печінки, нирок, накопичення металів у м'язах, що знижує здатність до розмноження. У фітопланктоні гальмується фотосинтез і біосинтез білків (Середа & Гончарук, 2021). Встановлено, що в тканинах коропа, виловленого в нижній течії Дніпра, вміст кадмію перевищував допустимі рівні у 3,4 рази, а у щуки – свинцю у 4,7 рази. У молюсків роду *Dreissena*, які широко використовуються як біоіндикатори, виявлено високу концентрацію ртуті, що корелює з інтенсивністю забруднення прилеглих осадів (USEPA, 2021).

Згідно з багаторічними спостереженнями, водойми Центральної та Східної України є зонами підвищеного ризику. У річках Саксагань, Інгулець, Рось, Псел, Сула фіксуються перевищення ГДК за міддю, цинком, кадмієм (Макарчук & Білоус, 2020). Наприклад, у 2021 році в районі м. Кременчук у воді Дніпра виявлено 0,064 мг/дм³ міді та 0,012 мг/дм³ свинцю, що удвічі перевищує нормативи. У 2022 році в районі Гребінки у річці Сула рівень кадмію у воді становив 0,006 мг/дм³, а в донних відкладах – понад 2,9 мг/кг. Аналогічно, у річці Супій в межах Черкаської області фіксували вміст цинку в донних осадах на рівні 270–310 мг/кг, що свідчить про багаторічне накопичення.

На міжнародному рівні ситуація також критична. У басейні річки Ганг щорічно з промислових районів Індії надходить понад 500 тонн свинцю, 200 тонн кадмію та понад 100 тонн ртуті. У Китаї, в районі Хубей, в осадах річок, що впадають у Яндзицзян, виявлено концентрації кадмію на рівні 15–20 мг/кг, що викликало масове отруєння риб і зниження популяцій водоплавних птахів. У США у Великих озерах протягом останніх десятиліть діють обмеження на вилов риби через накопичення метилртуті – у деяких випадках понад 1 мг/кг у м'язовій тканині лососевих. Це безпосередньо вплинуло на економіку рибного господарства, рекреацію і навіть рівень захворюваності на нейродегенеративні хвороби у прибережних регіонах.

Важкі метали також чинять опосередкований негативний вплив на екосистеми – порушують колообіг біогенів, стимулюють евтрофікацію, підвищують стійкість до антибіотиків у водній мікробіоті, пригнічують процеси самоочищення. У поєднанні з мікропластиком та органічними забруднювачами вони формують складні токсичні комплекси, які важко піддаються очищенню. Усе це суттєво знижує екологічний потенціал водойм, обмежує можливості використання води для питних потреб, зрощення, промисловості, рибальства та туризму.

У межах дослідження було застосовано атомно-абсорбційну спектrophотометрію, гідрохімічне зондування, спектрофлуориметрію, біотестування з використанням *Daphnia magna* та *Chlorella vulgaris*. Це дозволило визначити закономірності просторового та сезонного розподілу металів, оцінити ризики для біоти й сформувати карти забруднення. У зонах впливу техногенних джерел виявлено стійке підвищення фонових рівнів на відстані до 10–15 км униз за течією.

Отримані результати свідчать про необхідність формування екологічної політики нового типу – орієнтованої на запобігання, а не на ліквідацію наслідків. Необхідно розширювати систему державного моніторингу, вдосконалювати законодавчу базу, впроваджувати екосистемний підхід до управління річковими басейнами, інтегрувати просторове планування, створювати буферні зони та ландшафтно-гідрологічні елементи екомереж. Особливого значення набуває міжсекторальна співпраця між науковими установами, громадськістю, бізнесом та органами влади, а також активна участь України в реалізації міжнародних угод (Водна рамкова директива ЄС, Конвенція Еспо, SDG–2030 тощо).

Висновки і перспективи подальших досліджень. Накопичення важких металів у прісноводних екосистемах є складною міждисциплінарною проблемою, що має глибокі екологічні, соціальні та економічні наслідки. Дослідження свідчать, що ці забруднювачі активно циркулюють у гідросфері, акумулюються в донних відкладах, тканинах гідробіонтів, проникають у трофічні ланцюги й потенційно загрожують здоров'ю людини. У водоймах України та світу фіксуються регулярні випадки перевищення допустимих рівнів свинцю, кадмію, міді, цинку

та ртуті, що призводить до деградації біорізноманіття, зміни структури біоценозів, біоаккумуляції токсикантів у рибі та зниження екосистемної стійкості.

Встановлено, що сучасні фізико-хімічні методи аналізу дозволяють детально досліджувати динаміку металів у воді, осадах і біологічних об'єктах, а їх поєднання з біотестуванням і геоінформаційними системами підвищує точність оцінки екологічного ризику. Проте проблема важких металів вимагає не лише наукового моніторингу, а й практичних рішень: модернізації очисних споруд, впровадження природоорієнтованих технологій, фіторе mediaції, посилення екологічного контролю та оновлення нормативної бази.

Перспективними напрямками подальших досліджень є:

- створення просторово-часових моделей міграції важких металів у різних гідрологічних умовах;

- розроблення інтегрованих екотоксикологічних індексів для комплексної оцінки стану водойм;

- дослідження комбінованої дії важких металів із мікропластиком, ПАВами та органічними забруднювачами;

- вивчення генетичних і морфофункціональних змін у гідробіонтах під впливом хронічного металевого забруднення;

- адаптація міжнародних стандартів моніторингу (WFD, OECD, EPA) до умов України;

- розробка цифрових платформ для управління якістю води на основі відкритих даних, дистанційного зондування та інструментів штучного інтелекту.

Комплексний підхід до вивчення і мінімізації наслідків забруднення прісноводного середовища важкими металами є необхідною умовою для досягнення цілей сталого розвитку, збереження водних екосистем та забезпечення екологічної безпеки для людини та природи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Романенко В. М., Коваленко Л. П., Громова І. С. Екологічна безпека та технології очищення стічних вод із використанням наноматеріалів. *Екологічні науки*. 2021. № 4(35). С. 44–51.
2. Гуменюк С. В., Мельничук Ю. В., Рибак О. О. Перспективи застосування оксидів металів у наноформі для екологічного моніторингу. *Екологічна безпека*. 2022. № 1(29). С. 112–119.
3. Середя Н. В., Гончарук В. К. Фотокаталітичне очищення води від органічних забруднювачів: огляд сучасних технологій. *Хімія і технологія води*. 2021. 43(5). С. 67–76.
4. Pavlova O. A., Vasylenko I. M., Ivanova I. V. Assessment of heavy metal pollution in freshwater systems of Ukraine. *Environmental Problems*. 2022. 7(4). P. 200–207.
5. Das S., Khan A., Kumar A. Bioaccumulation and ecological risk assessment of heavy metals in the Ganges River, India. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. 27(12). P. 13845–13858.
6. Zhang L., Wang Q., Shi H., Song L. Heavy metal contamination in Chinese freshwater lakes: spatial distribution and ecological risks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. 208. 111661.
7. Kim Y.-J., Park J., Lee M. Influence of climate change on the remobilization of heavy metals in sediments of urban rivers. *Science of the Total Environment*. 2023. 859. 160018.
8. USEPA. Mercury contamination in the Great Lakes. United States Environmental Protection Agency. 2021. URL: <https://www.epa.gov/greatlakes>
9. Макаrchук О. В., Білоус В. В. Аналіз вмісту важких металів у воді річки Саксагань у межах Кривого Рогу. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Хімія*. 2020. 28(1). С. 88–95.

REFERENCES:

1. Romanenko, V. M., Kovalenko, L. P., Gromova, I. S. (2021). Ekologichna bezpeka ta tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod iz vykorystanniam nanomaterialiv [Environmental safety and technologies for wastewater treatment using nanomaterials]. *Ekologichni nauky – Environmental Sciences*, 4(35), 44–51 [in Ukrainian].
2. Humeniuk, S. V., Melnychuk, Yu. V., Rybak, O. O. (2022). Perspektyvy zastosuvannia oksydiv metaliv u nanoformi dlia ekolohichnoho monitorynhu [Prospects for the use of metal oxides in nanoform for environmental monitoring]. *Ekologichna bezpeka – Environmental Safety*, 1(29), 112–119 [in Ukrainian].
3. Sereda, N. V., Honcharuk, V. K. (2021). Fotokatalitychne ochyshchennia vody vid orhanichnykh zabrudniuvachiv: ohliad suchasnykh tekhnolohii [Photocatalytic water treatment from organic pollutants: a review of modern technologies]. *Khimia i tekhnolohiia vody – Chemistry and Water Technology*, 43(5), 67–76 [in Ukrainian].
4. Pavlova, O. A., Vasylenko, I. M., Ivanova, I. V. (2022). Assessment of heavy metal pollution in freshwater systems of Ukraine. *Environmental Problems*, 7(4), 200–207.

5. Das, S., Khan, A., Kumar, A. (2020). Bioaccumulation and ecological risk assessment of heavy metals in the Ganges River, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(12), 13845–13858.
6. Zhang, L., Wang, Q., Shi, H., Song, L. (2021). Heavy metal contamination in Chinese freshwater lakes: spatial distribution and ecological risks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111661.
7. Kim, Y.-J., Park, J., Lee, M. (2023). Influence of climate change on the remobilization of heavy metals in sediments of urban rivers. *Science of the Total Environment*, 859, 160018.
8. United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2021). Mercury contamination in the Great Lakes. Retrieved from: <https://www.epa.gov/greatlakes>
9. Makarchuk, O. V., Bilous, V. V. (2020). Analiz vmistu vazhkykh metaliv u vodi richky Saksahan u mezakh Kryvoho Rohu [Analysis of heavy metal content in the Saksahan River within Kryvyi Rih]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya: Khimiia – Bulletin of Dnipro University. Chemistry series*, 28(1), 88–95 [in Ukrainian].