

Сучасні методи ідентифікації тяжких металів у водному середовищі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.121>

Андрій Сафоник
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Олена Поліухович
Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна
o.o.poliukhovych@nuwm.edu.ua

Михайло Антикало
Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
m.m.antykalo@nuwm.edu.ua

Анотація—Моніторинг вмісту важких металів у водному середовищі є важливою складовою екологічного контролю, оскільки ці елементи мають високу токсичність і здатність до біоаккумуляції. У роботі розглянуто сучасні підходи до визначення важких металів у водних зразках, зокрема сорбційні, вольтамперометричні, хроматографічні, спектральні та фотометричні методи. Наведено характеристики їхніх переваг, обмежень і галузей застосування. Особливу увагу приділено використанню модифікованих сорбентів, розвитку твердофазної спектрофотометрії та вдосконаленню обладнання для експресного аналізу.

Ключові слова—важкі метали, сорбційний метод, атомно-абсорбційна спектроскопія, вольтамперометрія, фотометрія, мас-спектрометрія, хроматографія, аналітичний контроль, екологічний моніторинг.

I. ВСТУП

Сучасний стан навколишнього середовища значною мірою визначається рівнем техногенного навантаження, спричиненого інтенсивним розвитком промисловості, транспорту та сільського господарства. Однією з найактуальніших екологічних проблем сьогодення є забруднення природних вод важкими металами, які належать до стійких токсикантів, здатних до біоаккумуляції та біомагніфікації в трофічних ланцюгах. Навіть у незначних концентраціях ці елементи виявляють мутагенну, канцерогенну та цитотоксичну дію, що становить серйозну загрозу для гідробіотів, рослин, тварин і людини [1, 7].

Важкі метали надходять у водне середовище з промисловими та побутовими стоками, змивами з територій полігонів, підприємств кольорової металургії, машинобудування, хімічної, шкіряної, текстильної промисловості тощо. Їхнє поширення та міграційна здатність залежать від ряду фізико-хімічних факторів: рН, температури, окисно-відновного потенціалу, наявності органічних речовин і суспендованих частинок. Внаслідок складних процесів сорбції, комплексоутворення та осадження важкі метали можуть переходити між розчинною та твердою фазами, що ускладнює їхнє визначення та контроль у реальних пробах.

У зв'язку з цим надзвичайно важливим є застосування високочутливих, селективних та відтворюваних аналітичних методів, здатних виявляти сліди металів у різних середовищах — природних, питних та стічних водах.

Сучасні підходи до визначення важких металів орієнтовані не лише на досягнення високої точності та чутливості, а й на підвищення експресності аналізу, автоматизацію процесів і мінімізацію витрат реагентів. Особливого значення набуває використання модифікованих сорбентів, які дозволяють поєднувати етапи концентрування та аналітичного визначення, а також розробка портативних приладів для польового моніторингу [2, 6].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою дослідження є аналіз та узагальнення сучасних методів визначення важких металів у водних середовищах, оцінка їхніх переваг, недоліків і можливостей застосування для екологічного моніторингу. Для досягнення мети необхідно розглянути фізико-хімічні принципи кожного з методів, їхню чутливість, специфічність, експресність та можливість застосування в польових і лабораторних умовах.

III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Серед широкого спектра методів визначення важких металів провідне місце посідають сорбційні технології. Вони дозволяють концентрувати мікрокомпоненти з великих об'ємів проб, знижуючи межу виявлення. Удосконалення сорбентів — важливий напрям сучасних досліджень. Розробляються дешеві та ефективні матеріали на основі природної сировини (деревні відходи, лушпиння ячменю), а також неорганічні матриці, модифіковані реагентами, які забезпечують селективне вилучення металів [3, 4].

Серед електрохімічних методів особливе місце займає вольтамперометрія, яка поєднує високу чутливість і швидкість аналізу, дозволяючи одночасно визначати декілька металів у малих концентраціях.

Тонкошарова хроматографія (ТСХ) характеризується простотою обладнання та

доступністю, проте потребує значного часу аналізу. Вона застосовується не лише для важких металів, а й для пестицидів, органічних сполук, нафтопродуктів.

Атомно-емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою (АЕС-ІЗП) вирізняється високою точністю, чутливістю та широким діапазоном визначення елементів. Метод ефективний для контролю промислових викидів, дослідження ґрунтів, повітря та води, але потребує дорогого обладнання.

Мас-спектрометрія залишається одним із найрезультативніших методів, особливо у поєднанні з газовою або рідинною хроматографією. Вона використовується для ізотопного та елементного аналізу, а також для виявлення слідів забрудників у природних і техногенних зразках.

Атомно-абсорбційна спектроскопія (ААС) — один із найпоширеніших методів аналізу водних об'єктів, який забезпечує високу точність визначення таких металів, як Cd, Hg, Pb, Ni та інших. Методика входить до стандартів визначення важких металів у природних і стічних водах.

Фотоколориметрія та спектрофотометрія використовуються для візуального або фотоелектричного визначення інтенсивності забарвлення розчинів. Сучасні портативні фотоколориметри забезпечують експрес-аналіз у польових умовах, а модифікації спектрофотометрії дозволяють досліджувати широкий спектр органічних та неорганічних сполук.

Твердофазна спектрофотометрія (ТФС) поєднує сорбційне концентрування та фотометричний аналіз сорбентів, що забезпечує високу чутливість і низький межовий рівень виявлення. Її застосовують для визначення Cu, Pb, Zn, Fe, Cd, Hg у водах, харчових продуктах та ґрунтах.

Загалом, поєднання сорбційних технологій із спектральними та фотометричними методами дозволяє підвищити чутливість, скоротити час аналізу та розширити можливості ідентифікації металів у складних матрицях [5].

IV. ВИСНОВКИ

Проведений аналітичний огляд сучасних методів визначення важких металів у водному середовищі показав, що розвиток інструментальних технологій аналізу спрямований на підвищення точності, селективності та чутливості визначення, а також на зменшення часу проведення аналізу й спрощення пробопідготовки.

Сорбційні методи залишаються одним із найперспективніших напрямів аналітичної хімії завдяки своїй універсальності, простоті виконання та можливості поєднання з іншими інструментальними підходами — атомно-абсорбційною спектроскопією, спектрофотометрією, вольтамперометрією тощо. Використання модифікованих органічних і неорганічних сорбентів дозволяє підвищити селективність вилучення металів і точність кількісного визначення.

Атомно-емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою та мас-спектрометрія

демонструють надзвичайно низькі межі виявлення та широкий аналітичний діапазон, проте вимагають значних матеріальних витрат і високої кваліфікації персоналу. Вольтамперометрія, натомість, забезпечує експресність, багатокомпонентність аналізу та можливість використання в польових умовах. Методи фотометрії й спектрофотометрії, особливо в твердофазному виконанні, зберігають значення як доступні, відтворювані й наочні інструменти для оперативного екологічного контролю.

Розвиток аналітичної бази екологічного моніторингу сьогодні орієнтований на створення портативних, автоматизованих систем аналізу, здатних виконувати вимірювання безпосередньо у польових умовах із високою точністю та мінімальною участю оператора. Важливим напрямом подальших досліджень є синтез нових високоефективних сорбентів із прогнозованими властивостями, розроблення комбінованих методик, що інтегрують сорбційне концентрування з оптичними або електрохімічними методами детектування.

Отже, систематизація та вдосконалення сучасних методів визначення важких металів у водному середовищі є необхідною умовою підвищення ефективності моніторингу стану довкілля, забезпечення достовірності результатів аналізу та формування науково обґрунтованих заходів щодо охорони водних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Полухович, Сергій & Сафоник, Андрій & Грищок, Володимир. (2024). Ідентифікація домішкових компонент у процесі магнітного фільтрування рідких середовищ. *Modeling, Control and Information Technologies*. 314-317. 10.31713/MCIT.2024.098.
- [2] Lastovetskyi, Dmytro & Сафоник, Андрій & Полухович, Сергій. (2023). Інноваційні підходи до керування та моніторингу систем біологічного очищення стічних вод. *Modeling Control and Information Technologies*. 218-220. 10.31713/MCIT.2023.067.
- [3] Кичкирук, О & Кусяк, Н & Яновська, Е. (2022). Сорбційно-рентгенофлуоресцентне визначення мікрокількостей деяких токсичних металів у природних об'єктах після їх попереднього концентрування на модифікованому силікагелі. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*. 155-166. 10.32782/naturaljournal.1.2023.155-166.
- [4] Дзюба, Ганна & Гагаріна, Леся. (2021). Дослідження сорбційних та кінетичних властивостей сорбентів на основі оксигідратованих іонів цирконію, алюмінію, заліза, марганцю для очищення питної води. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції Екологія Людина Суспільство*. 157-160. 10.20535/EHS.2021.232870.
- [5] Н.О. Тітова, Ю.В. Бойчук, "Сорбційно-аналітичні методи визначення токсичних металів у природних водах," *Аналітика і контроль*, т. 23, №1, с. 11–18, 2019.
- [6] Деменюк, О & Шульга, С & Бабич, І. (2023). Застосування залізовмісних коагулянтів для очищення річкової води у холодну пору року. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 200-207. 10.32782/tnv-tech.2023.4.25..
- [7] Дудат'єв, І & Притула, М & Озменчук, І. (2025). Інформаційно вимірювальна система визначення концентрації домішок у воді на основі кондуктометричного сенсора. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 69-75. 10.32782/tnv-tech.2025.