

Є.І. Жикевич, аспірант,
В.Г. Верховцев, д.г.н.

Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», Київ

БІОЛОГІЧНІ МЕТОДИ РЕМЕДІАЦІЇ ПІДЗЕМНИХ ВОД ЗАБРУДНЕНИХ РТУТТЮ

Анотація. У даній роботі розглянуто біологічні методи ремедіації підземних вод, які забруднені ртуттю. Проаналізовано основні методи біологічної ремедіації, а також проведено порівняння їх ефективності. А також визначено їхні обмеження, пов'язані з умовами середовища.

Ключові слова: біологічна ремедіація, ртутне забруднення, підземні води, мікробна біоремедіація, фіторемедіація, біореактори in situ.

Забруднення підземних вод становить суттєву екологічну проблему глобального масштабу. Наявність різноманітних забруднювачів, включаючи важкі метали, нафтопродукти, хлорорганічні сполуки, створює негативний вплив на якість водних ресурсів, зокрема підземних вод. Традиційні методи фізико-хімічної ремедіації, в деяких випадках, стають економічно невигідними та екологічно несприятливими. У цьому контексті біологічна ремедіація, що використовує живі організми для деградації або іммобілізації забруднювачів, є перспективною альтернативою.

Ртуть належить до одних із найнебезпечніших токсикантів, що потрапляють у навколишнє середовище внаслідок антропогенної діяльності. Промислові підприємства, які використовували ртуть у технологічних процесах, створюють ризик значного перевищення гранично допустимих концентрацій ртуті у підземних водах (Wang et al., 2020).

Традиційні фізико-хімічні методи, такі як відкачування та очищення (pump-and-treat), хімічна окислення, адсорбція активованим вугіллям та іонний обмін є ефективними, однак мають певні обмеження: високу вартість, складність технічного впровадження та потенційну небезпеку через утворення токсичних відходів (Akcil et al., 2015). На противагу їм, біологічні методи ремедіації підземних вод розглядаються як екологічно безпечна та економічно доцільна альтернатива, особливо для значних за площею територій із довготривалим забрудненням.

Найбільш поширеними біологічної ремедіації підземних вод є мікробна біоремедіація, фіторемедіація, біореактори in situ, проникні реактивні бар'єри з біологічною складовою.

Мікроорганізми відіграють ключову роль у геохімічному циклі ртуті через здатність трансформувати її сполуки. Механізми знешкодження ртуті

мікроорганізмами залежить від наявності у них особливих генетичних факторів резистентності до ртуті.

Фіторе mediaція – це комплекс методів використання рослин та взаємодіючих з ними мікроорганізмів задля очищення довкілля. Щодо ртутного забруднення підземних вод, фіторе mediaція може відбуватися за кількома способами:

- фітоекстракція – поглинання та накопичення ртуті у наземній частині рослини;
- ризофільтрація – адсорбція або осадження ртуті на корінні;
- фітостабілізація – закріплення ртуті у кореневій зоні;
- фітовипаровування – перетворення ртуті на летку форму та її вивільнення через листя.

Відповідно до досліджень Marrugo-Negrete та співавторів (2016), деякі гідрофіти, як от водяний гіацинт, очерет звичайний та рогіз широколистий, показали здатність накопичувати чимало ртуті. Ці рослини вважаються перспективними для створення штучних водно-болотних угідь (конструйованих вейландів) задля ре mediaції забруднених підземних вод.

Проникні реактивні бар'єри (ПРБ) – це технологія, що виконується на місці. Вона полягає у створенні в товщі ґрунту, на шляху руху забруднених підземних вод, проникної ділянки, заповненої реактивною речовиною. Для очищення від ртуті використовуються ПРБ, які містять біологічно активні складові. Наприклад, це можуть бути іммобілізовані мікроорганізми, що руйнують ртуть, або органічні субстрати, які сприяють росту місцевої мікрофлори, стійкої до ртуті.

Успішне застосування біологічних методів ре mediaції підземних вод від ртуті було висвітлено у дослідженні Velásquez-López та співавторів (2010). Вчені застосували суміш активованого вугілля з іммобілізованими бактеріями виду *Pseudomonas*, генетично модифікованими для наявності гену *merA*. Результатом стала висока ефективність видалення ртуті, досягаючи близько 95% за умови початкової концентрації до 5 мг/л.

Технологія біореакторів *in situ* передбачає формування у водоносному горизонті зон, де мікробіологічна активність буде підвищеною. Досягається це шляхом нагнітання через ін'єкційні свердловини розчинів поживних речовин, електронних донорів та акцепторів, а також, у разі потреби, спеціально підібраних мікроорганізмів.

На рис. 1 представлено порівняльну ефективність біологічних методів ре mediaції ртутного забруднення підземних вод.

Біологічні методи ре mediaції є перспективними напрямками очищення підземних вод від ртутного забруднення. Вони ґрунтуються на природних механізмах трансформації та знешкодження ртуті, які здійснюють мікроорганізми та рослини. Завдяки цьому вони є екологічно чистими та економічно вигідними, особливо при реалізації тривалих проектів з ре mediaції.

Основними перевагами біологічних методів ре mediaції підземних вод є незначне втручання в навколишнє середовище, відсутність суттєвого додаткового антропогенного впливу, можливість використання безпосередньо *in situ* та зменшення необхідності суттєвих земляних робіт. Разом з тим, біологічні методи

обмежені, оскільки їхня ефективність залежить від умов навколишнього середовища, порівняно повільної швидкості процесів та складності контролю за ними.

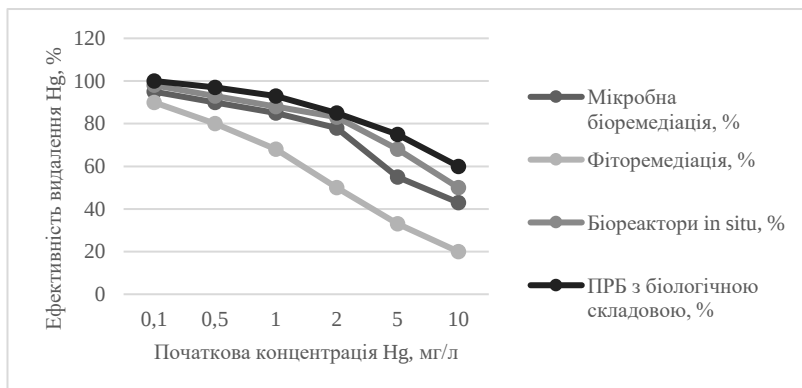


Рис. 1. Порівняльна ефективність біологічних методів ремедіації ртутного забруднення.

Список використаної літератури

1. Akcil, A., Erust, C., Ozdemiroglu, S., Fonti, V., & Beolchini, F. (2015). A review of approaches and techniques used in aquatic contaminated sediments: metal removal and stabilization by chemical and biotechnological processes. *Journal of Cleaner Production*, 86, 24-36.
2. Wang, J., Feng, X., Anderson, C. W., Xing, Y., & Shang, L. (2012). Remediation of mercury contaminated sites – A review. *Journal of Hazardous Materials*, 221-222, 1-18.
3. Marrugo-Negrete, J., Enamorado-Montes, G., Durango-Hernández, J., Pinedo-Hernández, J., & Díez, S. (2017). Removal of mercury from gold mine effluents using *Limnorcharis flava* in constructed wetlands. *Chemosphere*, 167, 188-192.
4. Velásquez-López, P. C., Veiga, M. M., & Hall, K. (2010). Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, 18(3), 226-232.