

Біомайнінг – екологічна технологія при видобутку металів

Біомайнінг, або біовилуговування, – це вилучення специфічних металів із руд, як правило, за допомогою бактерій. Хоча це новий метод, який використовується в гірничодобувній промисловості для видобутку корисних копалин, таких як мідь, уран та золото, проте сьогодні біомайнінг все частіше займає важливе місце серед доступних технологій видобутку. Сьогодні біомайнінг – це вже не перспективна технологія, а реальна економічна і екологічна альтернатива для обробки конкретних мінеральних руд. Традиційне видобування металевих руд включає багато дорогих та неекологічних етапів, таких як випал і плавка, які вимагають достатньої концентрації елементів у рудах та спричиняють значні викиди поллютантів в атмосферу. Але при низьких концентраціях (коли не вигідно добувати метал традиційними методами) запропоновано використовувати бактерії, оскільки вони просто ігнорують пусті породи, які оточують метали, досягаючи у деяких випадках чистоти металу до 90 %.

Ключові слова: біомайнінг; окислювач; вилуговування; сульфідні метали; розчинник; відвали; перколяція; рН.

Вступ. Наше вміння використовувати природні здібності певних мікроорганізмів для розробки різноманітних родовищ корисних копалин походить з Римської імперії ще з перших століть до нашої ери, і римляни, ймовірно, перейняли цей досвід у фінікійців [1–2]. Ті ранні шахтарі, використовуючи мікроорганізми для вилуговування міді з руди, не підозрювали, що це були бактерії, але зараз з'явилася тенденція до дослідження та розвитку біотехнологій, що дають певні потенційні результати, які можуть здійснити революцію в гірничодобувній промисловості.

Оскільки світові запаси високоякісної руди зменшуються і більшість з родовищ відпрацьовані через високий попит на метал, а металургійна промисловість належить до найбільших забруднювачів екології, то традиційні методи, такі як пірометалургія і хімічна переробка, стають все більш економічно та екологічно не вигідними. Мікроорганізми мають явну перевагу над застарілими методами, оскільки це не тільки економічно вигідний варіант, але також чиста технологія сталого розвитку. Бактерії, а іноді грибки перетворюють металеві сполуки в водорозчинні форми і є біокатализаторами цих процесів вилуговування. Крім того, застосовуючи біомайнінг, можна вилучати цінні метали з промислових відходів та відвалів гірничих підприємств, які можна використовувати повторно. Цей спосіб набуває все більшого значення для видобутку таких металів, як золото, мідь, залізо, уран та інші.

Мета та завдання:

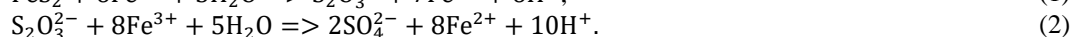
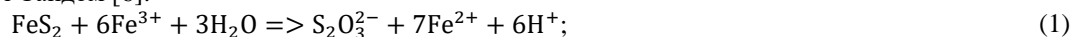
- проаналізувати технологію та механізми біомайнінгу;
- дослідити методи застосування біомайнінгу;
- розглянути цю технологію для використання на українських гірничодобувних підприємствах.

Викладення матеріалу і результати досліджень. Найчастіше біомайнінг застосовують для окислення мінералів заліза і сірки, це насамперед передбачає використання залізо- і сіркоокислювальних бактерій *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus caldus*, *Leptospirillum ferrooxidans* і *Leptospirillum ferriphilum* [3–4].

Для біомайнінгу використовують і деякі види грибів. Експерименти показали, що два грибові штами *Aspergillus niger* і *Penicillium simplicissimu* змогли вилувати Cu і Sn з чистотою 65 % і Al, Ni, Pb і Zn більш ніж на 95 % [5].

Механізм біомайнінгу. Мікроорганізми, які беруть участь у біовидобутку, насправді отримують енергію, розщеплюючи мінерали на складові елементи. Вчені [6] помітили, що окислення різних сульфідів металів відбувається через різні проміжні продукти та з неоднаковою швидкістю. Вони запропонували тіосульфатний механізм для окислення нерозчинних у кислоті сульфідів металів, таких як пірит (FeS_2) і молібденіт (MoS_2), і полісульфідний механізм для кислоторозчинних сульфідів металів, таких як сфалерит (ZnS), халькопірит (CuFeS_2).

У тіосульфатному механізмі солюбілізація відбувається через вплив заліза на нерозчинні в кислоті сульфідні метали, при цьому тіосульфат є основним проміжним продуктом, а сульфати – основним кінцевим продуктом. Використовуючи пірит як приклад, розглянемо реакцію, запропоновану вченими Шипперсом і Сандом [6]:



У випадку полісульфідного механізму солюбілізація кислоторозчинного сульфїду металу відбувається шляхом комбінованого впливу двовалентного заліза та позитивних іонів з елементарною сіркою як основним проміжним продуктом. Ця елементарна сірка відносно стабільна, але може бути окислена до сульфату мікробами, що окислюють сірку (3–5).



Це пояснює, чому саме бактерії, такі як *A. thiooxidans* або *A. caldus*, здатні вилугувати деякі сульфїди металів. Двовалентне залізо, що утворюється під час розчинення металу та біомайнінгу, також може повторно окислюватися організмами, що окиснюють залізо, до тривалентного заліза.



Роль мікроорганізмів у розчиненні сульфїдів металів полягає в тому, щоб забезпечити сірчану кислоту (5) для впливу позитивних іонів та підтримувати залізо в окисленому стані заліза (6) для окисної атаки на мінерали.

Вплив температури та рН. Фізичні умови, такі як температура та рН, є невід’ємним чинником для життєдіяльності мікроорганізмів і тому визначається для кожного виду бактерій окремо. Все ж це в основному вимагається для домінуючих бактерій в консорціумі, таких як *T. ferrooxidans* і *Leptospirillum ferrooxidans*. Основною причиною домінування *Leptospirillum* і *T. ferrooxidans* в промислових процесах є співвідношення Fe^3 / Fe^2 , тобто окисно-відновний потенціал [7]. Однак можуть бути й інші причини, які сприяють домінанту. Оптимальний рН для росту *T. ferrooxidans* знаходиться в межах рН 1,8–2,5, тоді як *L. ferrooxidans* є більш кислотостійким, ніж *T. ferrooxidans*, і росте при рН 1–2 [8]. Що стосується температури, то *T. ferrooxidans* є більш толерантним до низьких температур і менш толерантним до високих температур, ніж *L. ferrooxidans*. Деякі штами *T. ferrooxidans* здатні окислювати пірит при температурах до 10 °С (Norris, 1990), але оптимальною вважається 30–35 °С. Повідомляється, що лептоспірилоподібні бактерії мають верхню межу близько 45 °С з нижньою межею близько 20 °С. Більшість безперервних процесів біоокислення, які використовуються для обробки золотоносних арсеніпіритових руд або концентратів, працюють при 40 °С і рН 1–6 [9].

Методи видобутку. Два основних процеси, що використовуються в біомайнінгу, – це перколяція та перемішування. Техніка перколяції передбачає просочування вивільнювальної речовини через статичний шар, тоді як техніка перемішування передбачає перемішування частинок дрібнішого розміру в вивільнювальній речовині.

Біомайнінг переважно використовується для відвалів. Отримані збагачені металами розчини витягуються через свердловини, пробурені нижче рудного тіла [10]. Відвальне вилугування містить в собі недроблену пусту породу, яка накопичується. Ці відвали зазвичай містять близько 0,1–0,5 % міді, що є занадто низьким для рентабельного відновлення за допомогою звичайних процедур. Деякі з цих звалищ є величезними, містять понад 10 мільйонів тонн пустих порід.

Біомайнінг відвалів вимагає підготовки, в першу чергу зменшення їх розмірів, щоб максимально збільшити взаємодію мінералів і вилугувачів, а також укладання непроникної основи для запобігання втрати розчинів та забруднення водоїм.

По суті, вилугування передбачає нанесення речовини на верхню частину відвалу та наповнення його розчином, який має просочитися на дно самопливом. Розведена сірчана кислота, розпорошена зверху, просочується через вміст відвалів, знижуючи рН і сприяючи зростанню кислотофільних мікроорганізмів. Кислотний стік збирається на дні відвалу, звідки він перекачується на станцію відновлення. Метал витягується з кислотного стоку шляхом флотації або екстракції розчинником, або електровироблення.

Для прикладу я розгляну біомайнінг міді. Він вимагає перетворення нерозчинних у воді сульфїдів міді у водорозчинні сульфати міді. Мідні руди, такі як халькоцит (Cu_2S) або ковеліт (CuS), подрібнюються, підкислюються сірчаною кислотою та агломеруються в обертових барабанах для зв’язування тонкого матеріалу з частинками курсу перед складанням у відвали [11]. Потім відвали зрошуються розчином, що містить залізо, який просочується крізь відвал, а бактерії, що ростуть на поверхні руди, каталізують виділення міді в розчині. Тривалентне залізо, що утворюється бактеріями, відіграє важливу роль у виробництві мідного купоросу.



Розчин після біовилугування містить від 0,5 до 2,0 г/л розчиненої міді та до 20 г/л заліза, їх збирають і направляють на установку відновлення. Найпоширенішими методами вилучення міді є осадження з використанням великої флотаційної установки, електровибір або екстракція розчинником з подальшим електровилученням. Останній спосіб дає найвищий сорт міді [11].

Перспективи застосування біомайнінгу в Україні. Майбутнє біомайнінгу є перспективним на українських підприємствах, оскільки він має переваги, такі як простота експлуатації, низькі капітальні та

експлуатаційні витрати та короткі терміни будівництва, які не може забезпечити жоден інший альтернативний процес. Крім того, планується мінімізація впливу на навколишнє середовище та використання цієї технології в гірничодобувній промисловості України в Криворізькому залізрудному басейні, Нікопольському басейні марганцевих руд та інших. Ці підприємства мають величезні відвали гірської породи, які містять досить велику кількість краплень металів через не зовсім досконалі та застарілі технології видобутку та обробки, а традиційні методи, що дозволяють повторно виділити корисну копалину, економічно та екологічно не вигідні.

Висновки. Отже, посилене занепокоєння щодо впливу видобутку корисних копалин на навколишнє середовище, ймовірно, покращить конкурентні переваги процесів відновлення металу на основі біомайнінгу. Ця технологія має чудові перспективи та задовольнить концепцію сталого розвитку. Застосування більш суворого законодавства для обмеження забруднення навколишнього середовища зробить біомайнінг більш привабливим для промисловості будь-якої країни.

References:

1. Brierley, C.L. (1982), «Microbiological mining», *Scientific American*, No. 247 (2), pp. 42–51.
2. Rawlings, D.E. (2002), «Heavy metal mining using microbes», *Annual Review of Microbiology*, No. 56, pp. 65–91.
3. Clark, D.A. and Norris, P.R. (1996), «Acidimicrobium ferrooxidans gen. nov., sp. nov.: mixed-culture ferrous iron oxidation with *Sulfobacillus* species», *Microbiology*, No. 142, pp. 785–790.
4. Leduc, L.G. and Ferroni, G.D. (1994), «The chemolithotrophic bacterium *Thiobacillus ferrooxidans*», *FEMS Microbiol. Rev.*, No. 14, pp. 103–120.
5. Brauer, H. (1991), «Growth of Fungi and Bacteria in the Reciprocating Jet Bioreactor», *Bioprocess Engineering*, Vol. 6, pp. 1–15.
6. Schippers, A. and Sand, W. (1999), «Bacterial leaching of metal sulfides proceeds by two indirect mechanisms via thiosulfate or via polysulfides and sulfur», *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 65, pp. 319–321.
7. May, N., Ralph, D.E. and Hansford, G.S. (1997), «Dynamic redox potential measurement for determining the ferric leach kinetics of pyrite», *Miner Eng.*, Vol. 10, pp. 1279–1290.
8. Norris, P.R. (1983), «Iron and mineral oxidation with *Leptospirillum*-like bacteria», in Rossi, G. and Torma, A.E. (ed.), *Recent progress in biohydrometallurgy*, Associazione Mineraria Sarda, Iglesias, Italy, pp. 83–96.
9. Sand, W., Gerke, T., Hallmann, R. et al. (1993), «In situ bioleaching of metal sulfides: the importance of *Leptospirillum ferrooxidans*», *In Biohydrometallurgical Technologies*, Vol. I, pp. 15–27.
10. Bampton, K.F., Bologianis, F., Canterford, J.H. and Smith, A.N. (1983), «Development of experimental in-situ leaching at the Mutooro copper mine, South Australia», *Proceedings Australasian Institute of Mining and Metallurgy Annual Conference*, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, 10–15 July, pp. 371–379.
11. Schnell, H.A. (1997), «Bioleaching of copper», *Biomining: Theory, Microbes and Industrial Processes*, pp. 21–43.

Бондарчук Юрій Вікторович – студент кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-6231-369X>.

Наукові інтереси:

- екологізація гірничих підприємств;
- процеси гірничого виробництва.

E-mail: byura00@gmail.com.

Вовк Оксана Олексіївна – доктор технічних наук, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-7531-9847>.

Наукові інтереси:

- інноваційні технології в гірництві;
- сталий розвиток у гірництві;
- екологічні та альтернативні енергоресурси.

Bondarchuk Yu.V., Vovk O.O.

Biomining is an ecological technology for the extraction of metals

Biomining or bioleaching is the extraction of specific metals from ores, usually with the help of bacteria. Although it is a new method used in the mining industry to extract minerals such as copper, uranium and gold, biomining is increasingly becoming an important part of the available mining technologies today. Today, biomining is no longer a promising technology, but a real economic and ecological alternative for processing specific mineral ores. Traditional extraction of metal ores involves many expensive and non-environmental steps, such as roasting and smelting, which require sufficient concentration of elements in the ores and cause significant emissions of pollutants into the atmosphere. But at low concentrations (when it is not profitable to extract the metal by traditional methods), it is proposed to use bacteria, because they simply ignore the empty rocks that surround the metals, reaching in some cases a metal purity of up to 90 %.

Keywords: biomining; oxidizer; leaching; metal sulfides; solvent; dumps; percolation; pH.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2022.