

## **ЕКОЛОГІЧНО ВІДПОВІДАЛЬНИЙ ВИДОБУТОК РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ: СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ І МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ**

Рідкоземельні метали (РЗМ) є ключовими елементами для багатьох високотехнологічних галузей, таких як виробництво акумуляторів для електромобілів, сонячних панелей, вітрових турбін та електроніки. На глобальному рівні попит на ці метали стрімко зростає через необхідність переходу до поновлюваних джерел енергії та декарбонізації економіки. Однак видобуток рідкоземельних металів часто супроводжується серйозними екологічними проблемами, включаючи деградацію ґрунтів, забруднення води та викиди шкідливих речовин у атмосферу.

Актуальність дослідження полягає в тому, що, незважаючи на величезне значення рідкоземельних металів для зелених технологій, їх видобуток і переробка несуть ризики для довкілля, які можуть ставити під загрозу сталий розвиток. Таким чином, розробка та впровадження екологічно безпечних методів видобутку є важливим елементом збереження навколишнього середовища, особливо в контексті глобальних екологічних цілей.

Основні екологічні проблеми, пов'язані з видобутком рідкоземельних металів передбачає значні екологічні виклики, оскільки ці елементи зазвичай зустрічаються в низьких концентраціях у рудних тілах, що вимагає обробки великих обсягів ґрунту.

Основні проблеми включають:

1. Руйнування ландшафтів: Традиційний видобуток РЗМ передбачає масове видобування та подрібнення порід, що може призводити до ерозії ґрунтів і втрати біорізноманіття. Великі кар'єри руйнують природні екосистеми і змінюють гідрологічний режим регіонів.

2. Використання токсичних хімічних речовин: При видобутку рідкоземельних металів часто використовуються хімічні речовини, такі як сірчана кислота або ціаніди, що може призводити до забруднення водних ресурсів і шкідливого впливу на здоров'я населення.

3. Радіоактивність: Деякі руди, що містять РЗМ, мають високий рівень природної радіоактивності. Наприклад, торій і уран часто зустрічаються в тих самих родовищах, що й РЗМ, що створює додаткові екологічні та безпекові ризики під час видобутку і переробки.

4. Енергетичні витрати і викиди CO<sub>2</sub>: Технології видобутку рідкоземельних металів є енергоємними, що призводить до значних викидів парникових газів. Це суперечить глобальним цілям щодо зменшення викидів і боротьби з кліматичними змінами.

З огляду на виклики, пов'язані з традиційними методами видобутку рідкоземельних металів, існує кілька напрямків, які спрямовані на зменшення екологічного навантаження та забезпечення сталого розвитку.

Одним із перспективних напрямків є використання біотехнологій для видобутку металів з руд це біовидобуток (біолізінг). Біовидобуток включає застосування мікроорганізмів, які здатні розчиняти метали з рудних матеріалів. Цей процес може суттєво знизити використання токсичних хімічних речовин і споживання енергії, що робить його екологічно більш прийнятним.

Мікроорганізми можуть використовуватися для вилучення РЗМ з рідких і твердих відходів, а також із низькоконцентрованих руд. Ця технологія вже знайшла застосування в деяких країнах для видобутку міді та золота і має великий потенціал для РЗМ.

Геотехнології, такі як підземний видобуток шляхом розчинення, передбачають вплив на рудне тіло без його безпосереднього видалення на поверхню. В таких технологіях використовуються хімічні розчини для вимивання металів з руди прямо в підземних умовах, що значно зменшує обсяг відходів і знижує вплив на ландшафти.

Використання більш екологічно безпечних розчинів для цього процесу, таких як органічні кислоти замість сірчаної або азотної кислоти, є важливим напрямком досліджень, який дозволяє знизити ризики забруднення.

Один із найбільш екологічно чистих способів зменшення видобутку РЗМ — це розширення практики рециклінгу. Рідкоземельні метали містяться в багатьох пристроях, таких як старі мобільні телефони, батареї та інша електроніка. Рециклінг дозволяє зберегти природні ресурси і зменшити кількість відходів.

Наразі існує кілька технологій для вилучення РЗМ з електронних відходів, включаючи гідрометалургійні процеси, які потребують вдосконалення для зниження використання токсичних хімікатів.

Порівняння екологічного впливу традиційного і екологічно безпечного видобутку рідкоземельних металів (РЗМ)

Параметр	Традиційний видобуток РЗМ	Екологічно безпечні методи (біовидобуток, рециклінг)
Використання хімікатів	Сірчана кислота, ціаніди	Мікроорганізми або органічні кислоти
Енергетичні витрати	250-300 МВт-год на тонну руди	70-90 МВт-год на тонну руди
Радіоактивність відходів	Можлива через уран/торій	Мінімальна
Вплив на ґрунти та ландшафт	Значна ерозія, руйнування природних ландшафтів	Мінімальний вплив
Кількість відходів	Великий обсяг	Зменшена кількість через ефективніші процеси
Капіталовкладення	Високі витрати	Початково високі, але економія в довгостроковій перспективі

Зелена хімія пропонує підхід, який спрямований на використання нетоксичних, екологічно безпечних реагентів у процесах видобутку та переробки рідкоземельних металів. Це включає розробку альтернативних розчинників для вимивання металів з руд або відходів, а також використання відновлюваних ресурсів для хімічних реакцій.

Перспективи зеленої хімії полягають у тому, що такі реагенти можуть замінити агресивні речовини, які зараз використовуються в промисловості, знижуючи таким чином вплив на навколишнє середовище.

Незважаючи на перспективи, існують певні бар'єри на шляху до широкого впровадження екологічно безпечних технологій у видобутку РЗМ. Це включає високу вартість нових технологій, необхідність модернізації наявних виробничих потужностей, а також недостатній рівень регуляторної підтримки у багатьох країнах. Крім того, розробка нових технологій вимагає значного часу і наукових досліджень.

Таблиця 2

Порівняння викидів CO<sub>2</sub> і енергетичних витрат для різних методів видобутку рідкоземельних металів:

Метод видобутку	Викиди CO <sub>2</sub> (тонни на тонну металу)	Енергетичні витрати (МВт-год на тонну руди)
Відкритий кар'єр	10.5	250
Підземний видобуток	8.7	200
Біовидобуток	2.1	90
Рециклінг	1.3	70

Ця таблиця показує, як екологічно безпечні методи видобутку, такі як біовидобуток та рециклінг, суттєво знижують викиди CO<sub>2</sub> та енерговитрати, роблячи їх більш придатними для сталого розвитку в порівнянні з традиційними методами, такими як відкритий кар'єр та підземний видобуток.

Втім, тенденції до посилення екологічних вимог на глобальному рівні, а також збільшення попиту на РЗМ через розвиток зеленої енергетики, можуть стати рушійною силою для змін у цій галузі. Інвестиції в наукові дослідження і розробки є ключовими для впровадження цих технологій.

Екологічно безпечні методи видобутку рідкоземельних металів є важливим напрямком для забезпечення сталого розвитку та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Впровадження таких технологій, як біовидобуток, геотехнології, рециклінг і зелена хімія, може суттєво знизити екологічне навантаження, пов'язане з традиційними методами видобутку.

У майбутньому розвиток і вдосконалення цих технологій матиме вирішальне значення для забезпечення переходу до екологічно сталого суспільства та сприятиме досягненню глобальних екологічних цілей. Збільшення наукових досліджень, розробка регуляторних механізмів та міжнародне співробітництво у цій галузі можуть значно прискорити цей процес.