

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ГІРНИЧОЇ СПРАВИ, ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ТА
БУДІВНИЦТВА
КАФЕДРА ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис) Ірина ПАЦЕВА
(ініціали, прізвище)
“ ____ ” _____ 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи магістра

зі спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища»
(код і назва)

на тему: «Екологічно безпечні методи видобутку рідкоземельних металів:
технології для сталого розвитку»

Виконав: студент II курсу, групи ТЗНС-39м

НАУМОВ Ярослав Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник: доктор технічних наук, завідувач
кафедри екології та природоохоронних технологій

ПАЦЕВА Ірина Григорівна

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент: доцент, кандидат сільськогосподарських наук

МЕЛЬНИК-ШАМРАЙ Вікторія Вікторівна

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання
на відповідне джерело

Студент _____
(підпис)

Житомир – 2024 рік

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ГІРНИЧОЇ СПРАВИ, ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ТА
БУДІВНИЦТВА
КАФЕДРА ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ
СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 183 «ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИЩНЬОГО
СЕРЕДОВИЩА»

ЗАТВЕРДЖУЮ
зав. кафедри екології та
природоохоронних технологій
Ірина ПАЦЕВА
“ ” 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу

Студента НАУМОВА Ярослава Олеговича

Тема роботи: «Екологічно безпечні методи видобутку рідкоземельних металів: технології для сталого розвитку»

Затверджена Наказом університету від «03» вересня 2024 р. № 438/с _____

Термін здачі студентом закінченої роботи 30 листопада 2024 р.

Вихідні дані роботи (зазначається предмет і об'єкт дослідження):

Предмет дослідження – це екологічно безпечні методи видобутку рідкоземельних металів, включаючи біогідрометалургійні, фізико-хімічні та інноваційні технології, спрямовані на зниження екологічного навантаження.

Об'єкт дослідження - технологічні процеси видобутку та переробки рідкоземельних металів із природних і вторинних джерел.

Консультанти з кваліфікаційної роботи із зазначенням розділів, що їх стосуються.

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Вступ	Ірина ПАЦЕВА	20.09.2024	20.09.2024
Розділ 1	Ірина ПАЦЕВА	28.09.2024	28.09.2023
Розділ 2	Ірина ПАЦЕВА	27.10.2024	27.10.2024
Розділ 3	Ірина ПАЦЕВА	06.11.2024	06.11.2024
Розділ 4	Ірина ПАЦЕВА	24.11.2024	24.11.2024
Висновки	Ірина ПАЦЕВА	29.11.2024	29.11.2024

Керівник _____
(підпис)

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Обрати та затвердити тему дипломної роботи, визначити предмет та межі дослідження, скласти план роботи та погодити календарний графік його виконання з науковим керівником	Вересень 2023 року	
2.	Провести огляд науково-технічної літератури з аналізом стану, проблеми і напрямів вирішення завдань роботи	Жовтень 2023 року – січень 2024 року	
3.	Розглянути та обґрунтувати вибір методики, методів та об'єкту дослідження	Лютий 2024 року – квітень 2024 року	
4.	Провести експериментальні дослідження з розрахунковою схемою, аналізом результатів, їх точності й достовірності	Травень 2024 року – вересень 2024 року	
5.	Зробити висновки та запропонувати рекомендації щодо вирішення зазначеної проблеми	Жовтень 2024 року	
6.	Оформлення роботи згідно вимог	Листопад 2024 року	
7.	Здати закінчену роботу на кафедру	2 грудня 2024 року	

Студент:
 НАУМОВ Я.О. _____
 (підпис)

Керівник:
 ПАЦЕВА І.Г. _____
 (підпис)

Я, **НАУМОВ Ярослав Олегович**, цим засвідчую, що представлена до захисту магістерська робота на тему: **«Екологічно безпечні методи видобутку рідкоземельних металів: технології для сталого розвитку»** виконана на основі власних наукових досліджень. Текст не містить доробку інших дослідників без відповідних посилань на їх праці.

Я попереджений про те, що у разі виявлення фактів порушення мною академічної доброчесності буду недопущений до захисту, а в разі отримання диплому – буду позбавлений(на) його відповідно до: Закону України «Про освіту», Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку скасування рішення про присудження ступеня вищої освіти та присвоєння відповідної кваліфікації» та Положення про академічну доброчесність та етику академічних взаємовідносин в Державному університеті «Житомирська політехніка».

«__» _____ 2024 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЩОДО ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИДОБУТКУ ТА ПЕРЕРОБКИ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ: ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ПРОМИСЛОВОСТІ	11
1.1. Рідкоземельні метали у глобальному контексті.....	11
1.2 Екологічно безпечні методи видобутку рідкоземельних металів	15
1.2.1. Фізичні методи ремедіації.....	15
1.2.2. Хімічні методи ремедіації	17
1.2.3. Біологічні методи ремедіації	19
1.2.4. Інноваційні підходи до ремедіації.....	21
1.2.5. Екологічні аспекти інтеграції методів ремедіації.....	22
1.2.6. Економічні аспекти екологічно безпечної ремедіації.....	23
1.2.7. Екологічні стандарти та правове регулювання.....	23
Висновки до розділу 1:.....	27
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ ПЕРЕРОБКИ ТА ВИЛУЧЕННЯ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ	30
2.1 Критична роль рідкоземельних металів у сучасних технологіях та стійкому розвитку	46
2.2.1 Методи відновлення та вилучення рідкоземельних елементів з електронних відходів.....	49
2.2.2 Методи фізичного розділення та збагачення	50
2.2.3. Гідрометалургійні технології видобутку.....	52
2.2.4. Пірометалургійні методи видобутку	55
2.2.5. Біовилуговування.....	57
2.2.6. Надкритична флюїдна екстракція	59

2.2.7. Іонна рідинна екстракція.....	61
2.2.8. Пептиди, отримані з ланмодуліну	63
2.3.1. Відходи постійних магнітів: багате джерело РЗЕ	68
Висновки до розділу 2:	69
РОЗДІЛ 3 ІННОВАЦІЙНІ ТА ЕКОЛОГІЧНО СТІЙКІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВІДХОДІВ	72
3.1. Покращені процеси вилуговування та екстракції	72
3.2. Біогідрометалургія: сталий підхід	72
3.3. Проблеми та можливості у відновленні РЗЕ з відходів флуоресцентного порошку	74
3.4. Синергетичний розвиток ресурсокористування та екологічності	78
Висновки до розділу 3:	81
РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ВІДХОДІВ В ЯКОСТІ СИРОВИНИ ДЛЯ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ.....	83
4.1 Важливість належної утилізації при використанні фіторемедіації	84
4.2 Аналіз регіональних позицій для впровадження фіторемедіаційних проектів в Україні	98
Висновки до розділу 4:	100
ВИСНОВКИ:.....	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	104
ДОДАТОК А	123

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Рідкоземельні метали (РЗМ) відіграють критичну роль у сучасній економіці, оскільки є незамінними компонентами багатьох високотехнологічних виробів. Вони використовуються у виробництві електромобілів, вітрових турбін, сонячних панелей, смартфонів, акумуляторних батарей, магнітів і багатьох інших продуктів, які визначають технологічний прогрес та сприяють переходу до зеленої економіки. Зростання попиту на ці метали, особливо в контексті глобальних ініціатив щодо декарбонізації економіки та боротьби зі зміною клімату, створює нові виклики для забезпечення сталого видобутку та раціонального використання РЗМ.

Однак традиційні методи видобутку та переробки РЗМ мають значні екологічні недоліки. Видобуток супроводжується руйнуванням природних ландшафтів, забрудненням ґрунтів і водних ресурсів, а також викидами токсичних речовин і парникових газів. Особливу проблему становить утворення великих обсягів відходів, які є джерелом радіоактивного забруднення через супутні мінерали, такі як торій та уран. У країнах, де відсутній контроль за екологічними стандартами, ці проблеми стають ще більш вираженими, ставлячи під загрозу екосистеми та здоров'я населення.

Для України, яка має значний потенціал у сфері видобутку РЗМ, це питання набуває особливого значення. Наявність рідкоземельних родовищ у нашій країні створює перспективи для економічного зростання, розвитку високотехнологічних галузей та зменшення залежності від імпорту. Проте важливо забезпечити екологічно безпечний підхід до видобутку та переробки цих ресурсів. Використання застарілих технологій може призвести до суттєвого погіршення стану навколишнього середовища, тоді як впровадження сучасних екологічно орієнтованих методів здатне мінімізувати екологічний вплив і сприяти сталому розвитку.

Глобальний контекст також вказує на необхідність екологізації цієї галузі. Згідно з цілями сталого розвитку ООН, видобувна промисловість має забезпечувати раціональне використання природних ресурсів, мінімізувати екологічні ризики та сприяти економіці замкнутого циклу. Це вимагає інтеграції екологічних стандартів, впровадження новітніх технологій, таких як біогідрометалургія, екстракція надкритичною рідиною, а також застосування біотехнологій для рекультивації забруднених територій.

Актуальність теми підсилюється нагальною потребою у розвитку технологій переробки вторинних джерел РЗМ, таких як електронні відходи. Утилізація та повторне використання матеріалів із відпрацьованої техніки здатні зменшити потребу в первинному видобутку, зменшити обсяги відходів та забезпечити сталість у використанні природних ресурсів. Зокрема, в Україні все ще відсутні ефективні системи збору та переробки електронних відходів, що відкриває можливості для розвитку інфраструктури цієї галузі.

Таким чином, розробка та впровадження екологічно безпечних методів видобутку та переробки РЗМ є важливим напрямком наукових досліджень і практичної діяльності. Це сприяє досягненню балансу між економічними, екологічними та соціальними аспектами, відповідаючи глобальним і національним викликам. Впровадження інноваційних підходів до видобутку РЗМ допоможе Україні реалізувати свій потенціал як важливого гравця на ринку критичних матеріалів, забезпечуючи при цьому сталий розвиток і збереження навколишнього середовища.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувались на базі кафедри екології та природоохоронних технологій Державного університету «Житомирська політехніка» відповідно до науково-дослідних тем виконання студентами.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка та аналіз екологічно безпечних методів видобутку рідкоземельних металів, що сприятимуть зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище та

забезпечать ефективне використання природних ресурсів у рамках сталого розвитку.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані наступні **завдання**: Провести огляд сучасних технологій видобутку та переробки рідкоземельних металів, акцентуючи увагу на їх екологічних аспектах, дослідити екологічні ризики, пов'язані з традиційними методами видобутку РЗМ, провести економічний та екологічний аналіз запропонованих методів, надати рекомендації для впровадження екологічно безпечних технологій видобутку РЗМ в Україні.

Об'єкт дослідження є технологічні процеси видобутку та переробки рідкоземельних металів із природних і вторинних джерел.

Предмет дослідження є екологічно безпечні методи видобутку рідкоземельних металів, включаючи біогідрометалургійні, фізико-хімічні та інноваційні технології, спрямовані на зниження екологічного навантаження.

Новизна результатів роботи полягає у тому, що запропоновано нові науково обґрунтовані підходи щодо забезпечення прийняттого рівня екологічно безпечного рівня видобутку рідкоземельних елементів.

Практичне значення результатів роботи полягає у застосуванні в науково-дослідній діяльності комплексного підходу до забезпечення прийняттого екологічно безпечного рівня видобутку рідкоземельних елементів.

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи та окремі її результати обговорювалися на науково-практичних конференціях.

1. Наумов Я.О. Екологічно відповідальний видобуток рідкоземельних металів: сучасні технології для сталого розвитку і мінімізації екологічних ризиків. Тези Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування», Житомир, 14 листопада 2024 р. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2024. – С. 219 (Додаток А).

Публікації. За результатами виконаних досліджень магістрантом опубліковано 1 роботу у збірнику тез Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування».

Структура роботи. Дипломна робота викладена на 125 сторінках, складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 150 найменувань містить 16 рисунків, 13 таблиці.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЩОДО ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИДОБУТКУ ТА ПЕРЕРОБКИ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ: ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ПРОМИСЛОВОСТІ

Екологічно безпечні методи видобутку рідкоземельних металів є невід’ємною частиною сучасного підходу до розвитку промисловості. Зважаючи на глобальний перехід до «зеленої» економіки, екологічна складова стає не просто необхідністю, а конкурентною перевагою. Рідкоземельні метали, такі як літій, титан і графіт, є базовими елементами для інноваційних технологій у відновлюваній енергетиці, електротранспорті, аерокосмічній галузі та медицині. Разом із тим, їх видобуток потребує ретельного управління екологічними ризиками, оскільки традиційні методи часто призводять до деградації екосистем, забруднення води та утворення токсичних відходів. Для України, яка володіє значними покладами цих металів, розвиток видобувної галузі на основі екологічних стандартів є ключовим завданням у контексті сталого розвитку.

1.1. Рідкоземельні метали у глобальному контексті

Глобальний попит на рідкоземельні метали стрімко зростає. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства (IEA), до 2040 року потреба у літії зросте у 40 разів, у графіті — у 25 разів, а у титанових сполуках — удвічі. Це пов’язано з активним розвитком електротранспорту, відновлюваної енергетики та електронної промисловості. Наприклад, виробництво батарей для електромобілів вже стало основним драйвером попиту на літій і графіт, тоді як титанові сплави залишаються незамінними в авіабудуванні та оборонній галузі.

Україна, володіючи значними запасами стратегічних ресурсів, має всі передумови для того, щоб стати вагомим гравцем на світовому ринку рідкоземельних металів. Літій, наприклад, є основою для акумуляторних батарей, які використовуються в 71% випадків застосування цього металу, а графіт — важливий компонент у виробництві електродів і графену. Разом із тим, впровадження екологічних стандартів у видобувну галузь є обов'язковою умовою для інтеграції України до глобальних виробничих ланцюгів.

Українські запаси літію становлять близько третини від загальноєвропейських, що робить країну перспективним постачальником цього ресурсу для європейського ринку. Однак через бойові дії та відсутність інфраструктури більшість родовищ наразі не експлуатується. До 2022 року ЄС імпортував 20% своїх потреб у літій з Росії, але після початку війни попит на альтернативних постачальників значно зріс. Україна має унікальну можливість зайняти цю нішу.

Інноваційні методи видобутку, такі як пряме вилучення літію з розсолів, дозволяють зменшити споживання води на 70% і уникнути забруднення ґрунтових вод. Окрім цього, розвиток потужностей з переробки літію всередині країни може створити до 5 000 нових робочих місць і забезпечити додану вартість до \$1,5 млрд щороку.

На 2020 рік світові потужності з виробництва титанової губки були завантажені лише на 60%, що свідчить про значний простір для розширення цього ринку. Україна володіє 20% світових запасів титанових руд, але лише 10% родовищ використовуються у видобутку. Основними викликами залишаються екологічні ризики, пов'язані з традиційними методами видобутку, та залежність від експорту сировини замість виготовлення продукції з високою доданою вартістю.

Модернізація підприємств, таких як «Об'єднана гірничо-хімічна компанія», із впровадженням технологій сухого збагачення може зменшити використання води на 50% і знизити кількість токсичних відходів. Окрім того, створення виробничих потужностей для виготовлення титанових прокатів,

деталей для аерокосмічної галузі та медичного обладнання дозволить збільшити експортний потенціал і забезпечити стабільні валютні надходження.

Графіт є ключовим матеріалом для виготовлення акумуляторів і вогнетривів, а також для інноваційних матеріалів, таких як графен. Світовий ринок графену, за оцінками експертів, до 2030 року досягне \$1,5 млрд, і Україна має всі шанси стати частиною цього ринку. Наразі Україна забезпечує близько 8% потреб ЄС у графіті, але видобуток ведеться переважно для експорту сировини.

Екологічно орієнтовані технології видобутку графіту, які передбачають замкнені виробничі цикли, дозволяють скоротити викиди CO₂ на 30–40% і зменшити обсяги токсичних відходів. Розвиток внутрішніх потужностей для виготовлення електродів і графену забезпечить Україні нові можливості для інтеграції у високотехнологічні галузі.

Україна має значний потенціал для розвитку екологічно орієнтованого видобутку рідкоземельних металів. Основними викликами залишаються:

1. Інфраструктурні обмеження. Більшість родовищ розташовані у районах із недостатньо розвиненою інфраструктурою, що ускладнює їх освоєння.
2. Екологічні ризики. Традиційні методи видобутку спричиняють значне навантаження на довкілля.
3. Війна. Значна частина стратегічних ресурсів розташована в районах бойових дій або тимчасово окупованих територіях.

Водночас перспективи для розвитку галузі залишаються значними:

- Інтеграція інноваційних технологій, таких як біоліз, пряме вилучення літію та замкнені цикли виробництва, дозволить зменшити екологічний вплив і підвищити ефективність видобутку.
- Залучення міжнародних інвестицій та співпраця з країнами ЄС створять умови для модернізації галузі.

- Розвиток внутрішніх потужностей із глибокої переробки металів дозволить збільшити додану вартість продукції та забезпечити стабільні надходження до бюджету.

Розвиток екологічно безпечних методів видобутку рідкоземельних металів є стратегічним напрямом для України. Інтеграція сучасних технологій, зменшення екологічного навантаження та створення продукції з високою доданою вартістю забезпечать не лише економічне зростання, але й зміцнення міжнародних позицій країни як надійного постачальника стратегічних ресурсів. Успіх у цій сфері стане запорукою сталого розвитку України та її інтеграції до світової економіки.

Проблемою залишається те, що значна частина стратегічно важливих ресурсів розташована в регіонах, охоплених бойовими діями. Окрім того, застарілі стандарти оцінки родовищ, непрозорість процедур отримання дозволів та корупція в галузі видобутку перешкоджають залученню стратегічних іноземних інвесторів. Проте, з огляду на масштаби покладів, географічне положення та світовий попит, Україна має всі передумови стати ключовим гравцем на ринку рідкоземельних металів. Це вимагає розробки комплексної політики, спрямованої на впровадження екологічно безпечних методів видобутку та переробки, що дозволить реалізувати економічний екологічний і стратегічний потенціал країни.

Видобуток корисних копалин за допомогою підземних або відкритих методів призводить до накопичення відходів, які негативно впливають на навколишнє середовище [20]. Вугільні відвали характеризуються низьким рівнем рН, обмеженою електропровідністю, низьким вмістом поживних речовин та високою концентрацією токсичних елементів [17]. Природне заростання відвалів може зайняти принаймні 50–100 років, проте це не гарантує успішного вирішення проблеми [21]. Негативний вплив відвалів на навколишнє середовище включає зміни фізичної структури ґрунтів навколо промислового об'єкту, зміну біогеоценозу та зміни в структурі функціонування екосистеми в цілому [22].

1.2 Екологічно безпечні методи видобутку рідкоземельних металів

Видобуток рідкоземельних металів є складним технологічним процесом, який часто супроводжується значними екологічними викликами. Забруднення ґрунту, води та повітря, утворення токсичних відходів, а також деградація земель є типовими наслідками традиційних підходів у цій галузі. Однак завдяки застосуванню екологічно орієнтованих методів, таких як фізична, хімічна, біологічна ремедіація, можна мінімізувати вплив видобувної діяльності на довкілля. Ці технології дозволяють відновлювати природне середовище та забезпечувати стале використання природних ресурсів.

1.2.1. Фізичні методи ремедіації

Фізична ремедіація передбачає видалення або нейтралізацію забруднювачів за допомогою механічних та термічних методів. Одним із основних підходів є заміна поверхневого шару субстрату. Цей метод включає додавання чистого ґрунту або повну заміну забрудненого шару. Виділяють кілька підходів:

- Повна заміна субстрату. Забруднений ґрунт видаляється, а на його місце вноситься чистий, оброблений матеріал. Цей метод ефективний для сильно забруднених територій, але потребує значних фінансових витрат.
- Розсипання чистого ґрунту. Часткове перекопування та перемішування зменшує концентрацію токсичних речовин. Проте, якщо ґрунт не є достатньо обробленим, забруднювачі можуть поширюватися глибше, що може ускладнити подальшу ремедіацію.
- Імпортування нового субстрату. Велика кількість чистого ґрунту додається для покращення властивостей забрудненого субстрату. Цей метод підходить для невеликих територій із високим рівнем забруднення.

Важливим напрямом розвитку фізичних методів ремедіації є впровадження технологій використання природних матеріалів, таких як цеоліти, які ефективно поглинають токсичні метали та можуть

використовуватися для фільтрації ґрунтових вод. Наприклад, застосування цеолітів дозволяє знизити концентрацію кадмію та свинцю у ґрунті на 40–50% за короткий період.

Ще одним популярним методом фізичної ремедіації є термічна десорбція, яка використовує високу температуру для вилучення летючих забруднювачів. Цей підхід поділяється на:

- Низькотемпературну десорбцію (90–320°C). Використовується для видалення органічних забруднювачів із помірно забруднених ґрунтів.
- Високотемпературну десорбцію (320–560°C). Підходить для видалення складних і стійких токсичних речовин.

Термічна десорбція забезпечує повторне використання очищеного ґрунту, але її недоліками є висока енергоємність і тривалий час проведення.

Фізична ремедіація забруднених ґрунтів залишається одним із базових підходів у відновленні територій, які зазнали значного антропогенного впливу. Важливим аспектом цих методів є можливість швидкого зменшення концентрації забруднюючих речовин у поверхневих шарах субстрату шляхом фізичного вилучення, заміни чи трансформації[3,4].

Методи механічної ремедіації. До основних підходів належать механічне переміщення забрудненого ґрунту з метою його ізоляції у спеціальних полігонах. У багатьох країнах світу створюються контрольовані території для зберігання таких ґрунтів, що дозволяє уникнути поширення токсичних елементів. Наприклад, у США подібні методи застосовуються на об'єктах Superfund, де щороку утилізується понад 10 мільйонів тонн забрудненого ґрунту.

Рекультивация територій через заміну субстрату. Цей метод ефективний для відновлення промислових майданчиків, таких як кар'єри або хвостосховища, де забруднення перевищує критичні рівні. Заміна верхнього шару дозволяє швидко відновити біологічну активність ґрунту. Водночас для підвищення ефективності цього методу рекомендується використовувати

матеріали, які містять природні сорбенти, наприклад, цеоліти або бентонітові глини.

Термічна десорбція: деталі та перспективи. Метод термічної десорбції активно використовується для видалення летючих органічних сполук і деяких важких металів. Залежно від температурного режиму, цей метод поділяється на низькотемпературний (90–320°C), середньотемпературний (320–560°C) та високотемпературний (понад 560°C). Останній підхід дозволяє повністю знищувати органічні забруднювачі, включаючи стійкі органічні сполуки (СПО). У Німеччині термічна десорбція використовується для очищення ґрунтів у промислових регіонах Рур, де її ефективність досягає 85–95%.

Інноваційні підходи у фізичній ремедіації. Сучасні дослідження зосереджуються на використанні геотекстильних матеріалів для локалізації забруднювачів у ґрунті. Геомембрани, які утримують важкі метали, вже показали свою ефективність у зниженні міграції кадмію та свинцю на 60–70% у зонах захоронення промислових відходів.[5,6]

1.2.2. Хімічні методи ремедіації

Хімічна ремедіація спрямована на видалення або нейтралізацію токсичних елементів за допомогою спеціальних реагентів. Основний підхід включає промивання ґрунту, при якому забруднювачі переходять у рідку фазу завдяки впливу водних або хімічних розчинів. Для підвищення ефективності хімічної ремедіації активно розробляються методи із застосуванням наноматеріалів. Наприклад, наночастинки заліза (Fe^0) забезпечують високий рівень видалення важких металів і органічних забруднювачів завдяки своїй високій реактивності. Дослідження показують, що використання 0,1% наночастинок заліза знижує концентрацію забруднювачів у ґрунті на 60–70% у порівнянні з традиційними реагентами. До найбільш поширених реагентів належать:

- Хелатуючі агенти. Ефективні для видалення важких металів, таких як свинець і кадмій.
- Кислоти та основи. Фосфорна, сірчана, азотна кислоти активно використовуються для очищення ґрунтів, забруднених важкими металами та радіоактивними речовинами.
- Органічні розчинники. Застосовуються для видалення органічних забруднювачів, таких як нафтопродукти та пестициди.

Ефективність хімічної ремедіації залежить від багатьох факторів, включаючи рН, текстуру ґрунту та природу забруднювачів. Наприклад, дослідження показали, що додавання лимонної кислоти у поєднанні з фосфатами може досягти ефективності вилучення токсичних металів до 100%.

Хімічна фіксація є ще одним важливим методом, який передбачає введення речовин для перетворення токсикантів у менш мобільні форми. Наприклад, використання гідроксилапатиту дозволяє іммобілізувати важкі метали, зменшуючи їхню біодоступність[7,8,9].

Хімічні методи ремедіації є одним із найбільш гнучких підходів для очищення ґрунтів, які забруднені важкими металами, радіонуклідами та органічними речовинами. Вони базуються на реакціях нейтралізації, розчинення, адсорбції чи комплексоутворення, які перетворюють токсичні речовини на менш шкідливі форми.

Одним із найпоширеніших методів хімічної ремедіації є промивання ґрунту. Це передбачає використання розчинів на основі кислот (наприклад, H_3PO_4 , H_2SO_4) або основ (наприклад, NaOH) для розчинення важких металів чи органічних сполук. У дослідженнях встановлено, що фосфорна кислота ефективно видаляє іони AsO_4^{3-} через утворення розчинних комплексів, таких як HAsO_4^{2-} , у присутності хелатуючих агентів. При застосуванні лимонної кислоти ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) спостерігається значна ефективність вилучення солей As через утворення комплексів типу $[\text{As}(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7)]^-$. Для підвищення результативності процесу іноді додають вторинні реагенти, такі як $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, що забезпечує додаткове видалення кадмію у формі Cd^{2+} .

Метод хімічної фіксації передбачає додавання матеріалів, які реагують із важкими металами, утворюючи нерозчинні сполуки. Наприклад, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (гідроксилапатит) зв'язує іони Pb^{2+} у вигляді $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$, знижуючи їх біодоступність. Аналогічно, атапульгітова глина може зв'язувати свинець, зменшуючи його концентрацію на 46%[10,11,12].

Роль хелатуючих агентів у ремедіації. Хелатуючі агенти, такі як ЕДТА (етилендіамінтетраоцтова кислота) та цитрат, є ефективними реагентами для видалення важких металів, включаючи свинець, кадмій та цинк. Дослідження, проведені в Індії, показали, що використання 0,5% розчину ЕДТА дозволяє знизити концентрацію кадмію в ґрунті на 80%. Водночас у поєднанні з біологічними методами цей підхід дозволяє досягти ще вищої ефективності.

Промивання ґрунту: розширений аналіз. Хімічне промивання ґрунту часто використовується для видалення як важких металів, так і органічних забруднювачів. Наприклад, фосфорна кислота у концентрації 0,1–0,5% дозволяє видалити до 95% миш'яку з ґрунту за умови додавання невеликих кількостей хелатуючих агентів. Пористі ґрунти, такі як піски, краще піддаються промиванню, ніж глинисті, через високу проникність.

Комбіновані хімічні методи. Інноваційним підходом є поєднання хімічного промивання з електрокінетичною ремедіацією. Електричне поле сприяє руху хелатних комплексів через ґрунт, що дозволяє видалити забруднювачі з важкодоступних зон. У Польщі подібний підхід використовується для очищення територій, забруднених нафтохімічними продуктами.

1.2.3. Біологічні методи ремедіації

Біологічна ремедіація базується на застосуванні живих організмів, таких як мікроорганізми, рослини або тварини, для очищення забруднених субстратів. Одним із найпоширеніших методів є фіторемедіація, яка включає:

- Фітоекстракцію. Рослини поглинають токсичні речовини з ґрунту та накопичують їх у своїй біомасі.
- Фітостабілізацію. Зменшується міграція забруднювачів через адсорбцію та осадження.
- Фітовипаровування. Забруднюючі речовини переходять у газоподібний стан і видаляються через транспірацію рослин.

Дослідження показали, що модифіковані рослини, такі як *Arabidopsis thaliana*, можуть ефективно видаляти ртуть і інші важкі метали завдяки генетичним змінам, які активують ферменти для розкладання токсикантів[11,12,13].

Мікробне вилуговування є ще одним перспективним підходом, який дозволяє використовувати бактерії для вилучення металів із ґрунту. Цей метод ефективно застосовується для очищення субстратів, забруднених свинцем, кадмієм та іншими важкими металами.

Біологічні методи ремедіації базуються на здатності живих організмів, таких як бактерії, гриби, рослини та нижчі тварини, змінювати фізико-хімічні властивості забруднювачів і сприяти їх видаленню або нейтралізації.

Фіторемедіація: розширені можливості. Використання рослин для очищення ґрунтів є одним із найбільш перспективних напрямків. Наприклад, рослини роду *Brassica* здатні накопичувати в своїй біомасі до 10 мг/кг кадмію, що робить їх ефективними фітоекстракторами. У дослідженнях, проведених у Китаї, було встановлено, що модифіковані рослини *Arabidopsis thaliana* можуть видаляти до 95% ртуті з ґрунту[14,15,16].

Мікробна ремедіація. Бактерії роду *Pseudomonas* і *Bacillus* мають унікальну здатність розкласти органічні забруднювачі, включаючи нафтопродукти та пестициди. Наприклад, штами *Pseudomonas putida* використовуються для очищення нафтових плям у Мексиканській затоці, де вони зменшили рівень забруднення на 60% за три місяці.

Біореактивація. Це поєднання біологічної ремедіації з механічними методами, коли у ґрунт вводяться органічні субстрати (солома, гній), які

активують біологічну активність мікроорганізмів. Подібні підходи застосовуються в Україні для очищення забруднених сільськогосподарських земель.

1.2.4. Інноваційні підходи до ремедіації

Серед інноваційних технологій слід відзначити електрокінетичну ремедіацію, яка передбачає створення електричного поля для мобілізації забруднювачів. Переваги цього методу включають:

- Можливість використання на низькопроникних ґрунтах.
- Відносно низьку вартість установок.
- Збереження екологічного балансу та первинної структури ґрунту.

Ще одним новітнім підходом є скловидна ремедіація, яка базується на нагріванні субстрату до 1400–2000°C. Цей метод дозволяє перевести важкі метали у стабільну склоподібну форму, яка не мігрує у навколишнє середовище. Однак через високу енергоємність технологія є обмеженою у використанні[17,18,19].

Інноваційні методи очищення забруднених територій спрямовані на використання сучасних технологій, які дозволяють забезпечити високу ефективність при мінімальному впливі на довкілля.

Плазмове очищення. Плазмові технології забезпечують ефективне руйнування органічних забруднювачів і стабілізацію важких металів у склоподібній формі. Наприклад, у Японії плазмове очищення використовується для обробки промислових відходів, де ефективність видалення токсикантів досягає 99%.

Фотокаталітична ремедіація. Технологія базується на використанні наноматеріалів, таких як діоксид титану, який активується ультрафіолетовим світлом і руйнує органічні забруднювачі. В Іспанії ця технологія застосовується для очищення промислових територій, забруднених пестицидами.

Біоелектрохімічні системи. Інноваційним напрямком є використання електрохімічних реакторів, які активують мікроорганізми для деградації токсикантів. Ці системи дозволяють одночасно очищувати ґрунт і отримувати енергію. У Нідерландах подібні підходи застосовуються для очищення мулів каналів[22,23,26].

1.2.5. Екологічні аспекти інтеграції методів ремедіації

Інтеграція різних методів ремедіації стає дедалі актуальнішою у контексті зростаючих вимог до екологічної безпеки. Поєднання фізичних, хімічних, біологічних та інноваційних підходів дозволяє досягти максимальної ефективності очищення забруднених територій, знижуючи при цьому витрати та екологічний вплив.

Комбіновані технології ремедіації. Сучасні дослідження свідчать, що використання комбінацій методів значно підвищує ефективність очищення. Наприклад, застосування хімічного промивання ґрунту в поєднанні з мікробною ремедіацією дозволяє видаляти до 95% важких металів навіть із глинистих ґрунтів. Хімічні реагенти розчиняють токсиканти, роблячи їх доступними для бактерій, які завершують процес деградації[27,29,30].

Послідовне використання методів. Інтеграція фізичних і біологічних методів на практиці реалізується через такі послідовності:

- Початкове вилучення найбільш забруднених шарів ґрунту фізичними методами.
- Подальше очищення залишкових забруднювачів за допомогою мікробної ремедіації або фіторемедіації.

Наприклад, у США для очищення земель, забруднених нафтовими відходами, застосовується поетапний підхід: спочатку використовується термічна десорбція, а потім бактерії роду *Pseudomonas* для розкладання залишків вуглеводнів.

Інтеграція інноваційних технологій. Плазмові та фотокаталітичні системи добре поєднуються з фізичними методами. Так, очищення ґрунтів після термічної обробки може бути завершене за допомогою наноматеріалів для вилучення залишкових органічних сполук.

1.2.6. Економічні аспекти екологічно безпечної ремедіації

Розробка та впровадження екологічно орієнтованих технологій потребують значних фінансових вкладень, однак у довгостроковій перспективі вони є економічно вигідними завдяки зменшенню витрат на відновлення екосистем і захист здоров'я населення.

Оцінка витрат на ремедіацію. Залежно від обраного методу, витрати на очищення 1 м³ ґрунту коливаються від \$50 (фіторемедіація) до \$500 (термічна десорбція). Наприклад, для очищення територій площею 1 га із середнім рівнем забруднення важкими металами фіторемедіація потребує \$5 000–10 000, тоді як хімічне промивання — \$50 000.

Фінансова підтримка. У багатьох країнах для стимулювання впровадження екологічно орієнтованих технологій використовуються державні гранти та міжнародні програми. Наприклад, Європейський Союз виділив понад €500 млн для фінансування проєктів очищення земель, забруднених важкими металами та радіоактивними відходами, в рамках програми Horizon 2020.

Економія ресурсів. Поєднання біологічних і фізичних методів дозволяє зменшити енерговитрати на 30–40%. Використання локальних матеріалів, таких як цеоліти, також сприяє зниженню вартості ремедіації.

1.2.7. Екологічні стандарти та правове регулювання

Впровадження екологічно безпечних методів ремедіації вимагає дотримання міжнародних стандартів і національного законодавства. У цьому контексті важливими є наступні аспекти:

Міжнародні екологічні стандарти. Конвенція Стокгольма щодо стійких органічних забруднювачів визначає основні принципи управління забрудненими територіями. Наприклад, згідно з цим документом, усі методи ремедіації повинні забезпечувати мінімізацію викидів токсичних речовин[31,32,35].

Національне законодавство. В Україні правове регулювання у сфері очищення забруднених територій базується на законах «Про охорону навколишнього природного середовища» та «Про відходи». Важливим завданням є вдосконалення законодавства щодо стимулювання впровадження інноваційних технологій, включаючи фіскальні пільги для компаній, які займаються екологічно безпечним видобутком.

Контроль і моніторинг. Для забезпечення ефективності очищення необхідно впроваджувати системи моніторингу. Використання дронів і сенсорних мереж дозволяє оцінювати рівень забруднення в реальному часі, що значно спрощує управління процесами ремедіації.

Біомайнінг як екологічна альтернатива

Біомайнінг, або біовилуговування, є перспективною технологією, що використовує мікроорганізми для вилучення металів із руд. Застосування мікробів, таких як *Acidithiobacillus ferrooxidans* та *Leptospirillum ferrooxidans*, дозволяє руйнувати мінеральну матрицю руд, вивільняючи цінні метали. Цей метод характеризується низьким енергоспоживанням, відсутністю потреби у токсичних реагентах і можливістю роботи на низькосортних рудах.

Ключові переваги біомайнінгу:

1. Економічність: Зменшення витрат на хімічні реагенти та енергію порівняно з традиційними методами.
2. Екологічність: Відсутність токсичних викидів, характерних для хімічного вилуговування.
3. Застосування на низькосортних рудах: Мікроорганізми здатні вилучати метали навіть із руд із низьким вмістом цінних компонентів.

Практичне застосування: У Чилі біомайнінг використовується для вилучення міді, що дозволяє зменшити витрати на виробництво на 30%. Аналогічні дослідження ведуться щодо вилучення рідкоземельних металів, таких як скандій та ітрій, із техногенних відходів.

Іонометалургія: використання іонних рідин

Іонометалургія базується на застосуванні іонних рідин або глибоких евтектичних розчинників (DES) для вилучення металів із руд та відходів. Іонні рідини мають низьку летючість, високу хімічну стабільність і є безпечними для довкілля[40,41,43].

Особливості технології:

1. Селективність: Іонні рідини дозволяють вилучати певні метали, не впливаючи на інші компоненти руди.
2. Зниження відходів: DES можуть використовуватися повторно, що зменшує кількість вторинних відходів.
3. Ефективність на техногенних відходах: Іонні рідини забезпечують високу ефективність вилучення металів із фосфогіпсу, червоного шламу та іншого промислового сміття.

Практичний приклад: У Китаї DES використовуються для вилучення неодиму та празеодиму з магнітних відходів. За даними досліджень, вилучення цих металів досягає 92%, а використання рідин повторно зменшує витрати на 40%.

1.3. Комплексна переробка техногенних відходів

Техногенні відходи, такі як червоний шлам, фосфогіпс, шлами хвостосховищ, є перспективними джерелами рідкоземельних металів. Комплексна переробка дозволяє вилучати цінні метали, одночасно виробляючи будівельні матеріали, добрива або інші корисні продукти.

Приклади переробки:

1. Фосфогіпс: Містить до 0,2% рідкоземельних металів. Технологія переробки включає вилучення металів за допомогою кислотного вилуговування та виробництво гіпсових будівельних плит.

2. Червоний шлам: Відходи алюмінієвого виробництва, що містять ітрій, лантан і церій. У ЄС розроблено технології вилучення рідкоземельних металів із шламів із ефективністю до 85%.

3. Хвостосховища: Техногенні відходи, які містять значну кількість рідкоземельних металів, можуть бути перероблені із застосуванням біовилуговування та хімічного вилучення.

Сучасні підходи до видобутку РЗМ акцентують увагу на зменшенні використання енергії, води та хімічних реагентів. Це включає:

Сорбенти на основі магнетиту: Високоєфективні матеріали для очищення води та вилучення рідкоземельних металів із розчинів. Наприклад, у Німеччині застосування магнетитових сорбентів дозволяє очищувати до 10 000 м³ води за місяць із витратами на 20% нижчими, ніж у традиційних методах.

Вторинна переробка відходів: Наприклад, використання старих електронних пристроїв для вилучення рідкоземельних металів. У Японії із одного тонни електронного сміття отримують до 400 грамів рідкоземельних металів[44,45,46].

Мембранні технології: Застосування мембран для розділення компонентів рідких розчинів дозволяє підвищити ефективність вилучення металів на 30–50%.

Одним із найпоширеніших методів хімічної ремедіації є промивання ґрунту. Це передбачає використання розчинів на основі кислот (наприклад, H_3PO_4 , H_2SO_4) або основ (наприклад, NaOH) для розчинення важких металів чи органічних сполук. У дослідженнях встановлено, що фосфорна кислота ефективно видаляє іони AsO_4^{3-} через утворення розчинних комплексів, таких як HAsO_4^{2-} , у присутності хелатуючих агентів. При застосуванні лимонної кислоти ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) спостерігається значна ефективність вилучення солей As

через утворення комплексів типу $[\text{As}(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_7)]^-$. Для підвищення результативності процесу іноді додають вторинні реагенти, такі як $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, що забезпечує додаткове видалення кадмію у формі Cd^{2+} .

Метод хімічної фіксації передбачає додавання матеріалів, які реагують із важкими металами, утворюючи нерозчинні сполуки. Наприклад, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (гідроксилапатит) зв'язує іони Pb^{2+} у вигляді $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$, знижуючи їх біодоступність. Аналогічно, атапульгітова глина може зв'язувати свинець, зменшуючи його концентрацію на 46%.

Для забезпечення екологічної безпеки видобутку РЗМ необхідно впроваджувати сучасні системи моніторингу. Це включає:

1. Дистанційне зондування: Використання супутникових даних для контролю стану довкілля навколо видобувних об'єктів.
2. Сенсорні мережі: Розгортання сенсорних станцій для моніторингу рівня забруднення ґрунту та води в реальному часі.
3. Аналіз великих даних: Використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування ризиків і оптимізації процесів видобутку.

Висновки до розділу 1:

У першому розділі проведено детальний аналіз сучасних екологічно безпечних технологій видобутку та переробки рідкоземельних металів (РЗМ), наголошуючи на їхньому значенні для сталого розвитку промисловості. Розглянуто глобальний попит на РЗМ, який зростає через активний розвиток електротранспорту, відновлюваної енергетики та інших високотехнологічних галузей. Для України, яка володіє значними покладами стратегічних ресурсів, таких як літій, титан і графіт, розвиток екологічно орієнтованого видобутку є ключовим завданням.

Аналіз літературних джерел підкреслив необхідність впровадження інноваційних технологій, таких як пряме вилучення літію, сухе збагачення титанових руд і замкнені цикли виробництва графіту. Ці підходи дозволяють зменшити екологічний вплив, скоротити витрати енергії та води, а також підвищити ефективність вилучення РЗМ. Окрему увагу приділено

впровадженню методів ремедіації, включаючи фізичні, хімічні, біологічні та інноваційні підходи, які сприяють відновленню екосистем і забезпечують стаке використання природних ресурсів.

Інтеграція цих методів в Україні є перспективним напрямом, який сприятиме підвищенню конкурентоспроможності країни на глобальному рівні.

- Фізична ремедіація включає використання методів заміни поверхні субстрату або термодесорбції [24]. Метод заміни поверхні субстрату передбачає додавання чистого ґрунту до забрудненої ділянки через часткове або повне перемішування. Такий підхід сприяє фізичному розчиненню забруднювачів у ґрунті [25]. Заміна може здійснюватися кількома способами, зокрема шляхом повного вилучення забрудненого ґрунту та внесення чистого матеріалу. Важливо, щоб чистий субстрат був попередньо оброблений, інакше це може призвести до повторного забруднення. Альтернативою є розсипання чистого ґрунту, що включає перекопування субстрату, завдяки чому забруднюючі речовини переміщуються глибше, а концентрація токсикантів зменшується через змішування з чистим субстратом. Ще один підхід – внесення великої кількості нового ґрунту, який переміщується із забрудненим. Цей метод ефективний, але вимагає значних затрат ресурсів і підходить для невеликих за площею, але сильно забруднених територій [26].

- Термодесорбція як метод фізичної ремедіації ґрунту базується на використанні високих температур, які сприяють переходу забруднюючих речовин у леткий стан. Летючі речовини потім видаляються за допомогою вакуумного тиску або газу-носія. За рівнем температури термодесорбція поділяється на низькотемпературну (90–320°C) та високотемпературну (320–560°C). Цей метод має переваги у вигляді мобільності обладнання та можливості повторного використання очищеного ґрунту, однак його недоліком є висока собівартість і тривалість процесу [27].

- Хімічна ремедіація забруднених ґрунтів передбачає вилуговування забруднювачів за допомогою води, хімічних реагентів або газів. У процесі таких хімічних реакцій, як іонний обмін, осадження, адсорбція чи хелатування,

важкі метали переходять у рідку фазу, звідки вони видаляються через фільтрат. Наприклад, іони Pb^{2+} , Cd^{2+} або Zn^{2+} можуть бути переведені в комплексні форми з використанням хелатуючих агентів, таких як етилендіамінтетраоцтова кислота (EDTA), яка утворює стабільні комплекси типу $[Pb(EDTA)]^{2-}$. Подібні комплекси забезпечують мобілізацію металів і їх вилучення з ґрунту.

- Електрокінетична ремедіація базується на створенні електричного поля, яке сприяє міграції іонів через ґрунт. Під впливом постійного струму забруднюючі речовини, такі як Pb^{2+} , Zn^{2+} , мігрують до електродів, де вони акумулюються та видаляються. Цей метод особливо ефективний для глинистих ґрунтів, але може потребувати додаткового контролю рівня pH у зоні електродів.

- Біологічна ремедіація ґрунту базується на використанні живих організмів, таких як бактерії, рослини або гриби. Наприклад, мікроорганізми роду *Pseudomonas* здатні адсорбувати іони Cd^{2+} через позаклітинне комплексоутворення. У процесі фіторемердіації рослини, такі як *Brassica juncea*, поглинають Pb^{2+} і накопичують його у своїх тканинах. У методі фітовипаровування токсичні речовини, наприклад ртуть (Hg), переводяться в газоподібний стан через утворення летючих сполук, таких як диметилртуть $(CH_3)_2Hg$.

Ці методи дозволяють ефективно видаляти токсиканти, забезпечуючи відновлення екологічних параметрів забруднених територій.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ ПЕРЕРОБКИ ТА ВИЛУЧЕННЯ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ

Рідкоземельні елементи (РЗЕ), за визначенням Міжнародного союзу теоретичної та прикладної хімії (IUPAC), включають лантаноїди (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), а також скандій (Sc) і ітрій (Y), які часто зустрічаються поряд із лантаноїдами в мінеральних родовищах. Хоча РЗЕ отримали назву "рідкісних", насправді вони не є такими. Цей термін з'явився в XIX столітті, коли було відкрито обмежену кількість родовищ цих елементів. На той час вони були справді рідкісними порівняно з іншими елементами, але нині РЗЕ є досить поширеними в земній корі, їх кількість співставна з поширеністю таких металів, як хром, нікель, мідь, цинк, молібден і олово.

Сьогодні попит на РЗЕ значно зростає через їхню ключову роль у розвитку новітніх технологій і переході до стійкої глобальної економіки. РЗЕ використовуються у вітрових турбінах для генерації енергії, у системах зберігання енергії, таких як акумулятори, у виробництві енергоефективного освітлення, дисплеїв і електромобілів. Їх застосування дозволяє створювати компактні та ефективні компоненти для сучасних пристроїв, таких як комп'ютери, лазери та дисплеї. Крім того, РЗЕ мають унікальні фізико-хімічні властивості завдяки своїм електронним орбіталям (4f), які визначають їхні магнітні та оптичні характеристики. Ці властивості є незамінними в багатьох галузях, зокрема в промислових процесах, таких як каталітичні реакції, полірування поверхонь, виробництво скла, кераміки та спеціальних сплавів. Очікується, що в найближчі десятиліття спектр застосування РЗЕ ще більше розшириться, що призведе до зростання попиту на їх високу чистоту та нові форми[47,48,49].

Хоча РЗЕ є досить поширеними, виявлення родовищ із комерційною цінністю залишається складним завданням. Знаковою подією для галузі стала "криза РЗЕ" у 2010 році, коли Китай, що на той час забезпечував понад 95% світового виробництва, різко обмежив експорт через екологічні норми, квоти та тарифи. Це призвело до значного зростання цін і стимулювало пошук альтернативних джерел у США, Австралії, Канаді та інших країнах. Сьогодні Китай залишається лідером у виробництві РЗЕ, але його частка зменшилася до 58% світового виробництва. США, Австралія, М'янма і Таїланд стали значними гравцями на ринку, забезпечуючи відповідно 16%, 9%, 13% і 2% світового видобутку оксидів РЗЕ[50,51,52].

Виробництво РЗЕ в цих країнах у 2010 та 2020 роках порівнюється в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Геологічна служба США щодо глобального виробництва РЗЕ як РЗЕ у
2010 р. порівняно з 2020 р

Країна	2010 рік виробництва (т)	% частка	Виробництво 2020 (т)	% частка
Китай	130000	97	140000	58
США	-	-	39000	16
Австралія	-	-	21000	9
М'янма	-	-	31000	13
Таїланд	-	-	3600	2
інші	3400	3	5400	2
всього	133400	100	240000	100

Видобуток рідкоземельних елементів (РЗЕ) є важливим, але вкрай екологічно шкідливим процесом, який викликає значні занепокоєння через його вплив на навколишнє середовище і здоров'я людей. Зростаюча концентрація РЗЕ у довкіллі, особливо в районах активного видобутку, призводить до небезпечних екологічних змін. Основні джерела забруднення включають відкриті кар'єри, стічні води від переробки руд, а також шахтні

хвости. Дослідження також виявляють, що значна частина РЗЕ потрапляє у навколишнє середовище з міських та промислових відходів, включаючи електронні відходи[53,54,55].

Руди РЗЕ нерідко містять радіоактивні елементи, такі як уран (U) та торій (Th), що додатково посилює екологічний ризик. Ці елементи здатні накопичуватись у водних шляхах і викликати біоаккумуляцію в організмах. Люди, що проживають поблизу шахт, демонструють підвищений рівень РЗЕ у волоссі, крові, печінці, кістках і легенях. Це призводить до низки серйозних наслідків для здоров'я, таких як окислювальний стрес, порушення функцій дихальних шляхів, серцево-судинні захворювання та навіть цитогенетичні ушкодження сперматозоїдів. Зокрема, культури, такі як рис, активно накопичують РЗЕ, що становить додаткову небезпеку для харчових ланцюгів[56,57,58].

Дослідження Томаса та його колег свідчать, що високі концентрації РЗЕ, наприклад La^{3+} , Ce^{3+} та Y^{3+} , суттєво впливають на проростання рослин та розвиток біомаси, викликаючи тривогу щодо довгострокових екологічних наслідків. Водночас бракує даних про пороги токсичності для екосистем, що обмежує наше розуміння впливу РЗЕ на довкілля. Ці прогалини у знаннях спонукають до пошуку альтернативних джерел, щоб зменшити залежність від видобутку.

Промислові відходи демонструють перспективи як альтернативні джерела РЗЕ. Наприклад, червоний шлам від виробництва алюмінію та фосфорний гіпс містять комерційно придатні концентрації РЗЕ. Крім того, зола вугільних електростанцій також може використовуватись як джерело. Шахтні хвости у Маунтін-Пасс (США) містять до 5% оксидів РЗЕ, що робить їх потенційно вигідними для подальшої обробки. Проте цих джерел недостатньо для задоволення зростаючого попиту на ключові РЗЕ, такі як неодим (Nd) та диспрозій (Dy).

Таблиця 2.2

Вміст РЗЕ в різних джерелах електронних відходів (%)

Джерело	Неодим (Nd)	Диспрозій (Dy)	Європій (Eu)	Ітрій (Y)
Жорсткі диски	2,50	1,20	0,05	0,1
Акумулятори	0,8	0,5	0,01	0,05
Люмінесцентні лампи	0,2	0,1	0,3	0,4
Магніти електромобілів	5.0	2.0	0,02	0,03

У цьому контексті переробка електронних відходів стає головним напрямом досліджень. За даними Рене та його команди, у 2019 році у світі було вироблено 53,6 мільйона тонн електронних відходів, і цей показник, за прогнозами, зросте на 33% до 2030 року. Попри це, переробляється менш ніж 1% РЗЕ через складність вилучення цих елементів з компонентів електроніки. Низькі концентрації РЗЕ, їх розосередженість та висока вартість обробки залишаються ключовими викликами. Проте зростання цін на РЗЕ робить їх переробку економічно більш вигідною[59,60,61].

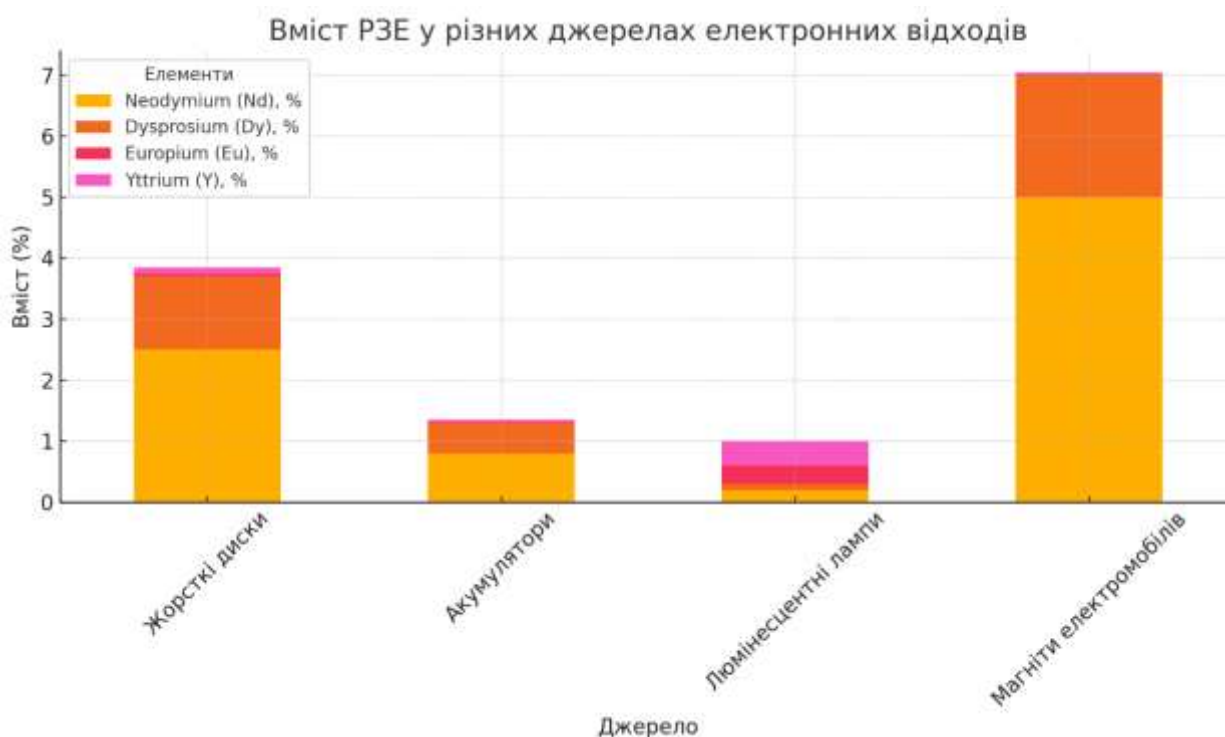


Рис. 2.1 Вміст РЗЕ у різних джерелах електронних відходів

Таблиця і графік, що ілюструють вміст деяких земельних елементів (РЗЕ) у різних джерелах електронних відходів, дають чітке уявлення про розподіл основних елементів у популярних пристроях. Найвищий вміст неодиму (Nd) та диспрозію (Dy) виявлено у магнітах електромобілів (5,0% і 2,0% відповідно), що робить їх найбільш перспективними для переробки. Жорсткі диски дають друге місце за вмістом цих елементів, із концентрацією 2,5% для Nd і 1,2% для Dy. Люмінесцентні лампи показують значний вміст європі (Eu) та ітрію (Y), відповідно 0,3% та 0,4%, що є місцем для освітніх технологій. Акумулятори, хоча і містять усі чотири елементи, мають найменшу концентрацію, що знижує їхню економічну привабливість для масштабної переробки.

Розрахунок коефіцієнта вилучення металів:

$$K = \frac{M_{\text{екстраговане}}}{M_{\text{сировина}}} \quad (2.1)$$

де: $M_{\text{екстраговане}}$ — маса екстрагованих металів (у кг),

$M_{\text{сировина}}$ — маса сировини, з якої видобуваються метали (у кг).

Станом на 2020 рік доступні запаси РЗЕ в електронних відходах оцінювалися у 375 000 тонн, з яких 29 167 тонн є придатними для переробки. Жорсткі диски, нікель-металгідридні батареї та люмінесцентні лампи є головними джерелами для відновлення РЗЕ, таких як Nd, Dy, Y та Eu. Попри це, проблеми балансу між попитом і надлишком деяких елементів, таких як La та Ce, залишаються. Ця проблема може бути вирішена через більш ефективну переробку критичних елементів.

Таблиця 2.3

Економічна вигода від переробки електронних відходів (\$/тонна)

Джерело	Прибуток за Nd	Прибуток за Dy	Прибуток за Eu	Сумарний прибуток
Жорсткі диски	25 000	12 000	500	37 500
Акумулятори	8000	5000	100	13 100
Люмінесцентні лампи	2000	1000	3000	6000

Магніти електромобілів	50 000	20 000	200	70 200
---------------------------	--------	--------	-----	--------

Таблиця 2.3 демонструє економічну вигоду від переробки РЗЕ з різних джерел. Магніти електромобілів генерують максимальний прибуток (70 200 \$/т), що пояснюється їх високим вмістом Nd і Dy. Жорсткі диски також забезпечують значний дохід (37 500 \$/т), завдяки концентрації цінних елементів. Люмінесцентні лампи, хоча й мають менший прибуток (6 000 \$/т), залишаються перспективними попитом на ЄС та У для освітніх і дисплейних технологій. Акумулятори забезпечують помірний прибуток (13 100 \$/т), але їх використання може бути стратегічно більшим через зростання попиту на електромобілі, що також ми можемо спостерігати на рисунку 2.2, що ілюструє дану ситуацію[62,63,64].

Формула економічної вигоди (R):

$$R = (P_r - C_t - C_e) \cdot Q - I \quad (2.2)$$

де: R - економічна вигода (у грошових одиницях);

P_r - ринкова ціна отриманого продукту (у грошових одиницях за одиницю);

C_t - вартість технологічного процесу видобутку та переробки на одиницю продукту (у грошових одиницях);

C_e - витрати на екологічні заходи (очищення, рекультивация, утилізація відходів тощо) на одиницю продукту (у грошових одиницях);

Q - обсяг видобутку та переробки (у одиницях продукту);

I - початкові інвестиції в технології, обладнання та інфраструктуру (у грошових одиницях).

Розробка нових методів переробки є необхідною. Менш інтенсивні хімічні процеси, такі як вибуговування за допомогою іонних рідин або використання мікробів, демонструють перспективи. Такі підходи можуть значно знизити екологічний слід, водночас підвищуючи ефективність. Переробка електронних відходів має потенціал значно зменшити обсяг токсичних викидів, які утворюються під час видобутку або потрапляють до

навколишнього середовища через звалища. Значна кількість досліджень зосереджується на вилуговуванні РЗЕ з постійних магнітів, батарей та люмінесцентних покриттів. Магніти є основним джерелом Nd і Dy, тоді як батареї містять La та Ce. Люмінесцентні лампи забезпечують доступ до Eu, Y та Tb. Попри це, менший інтерес дослідників до відновлення РЗЕ з таких джерел, як каталізatori чи скло, обмежує можливості у цій сфері. Розширення цих напрямів досліджень та промислового застосування має вирішальне значення для майбутньої стабільності світового ринку РЗЕ[65,66,67].

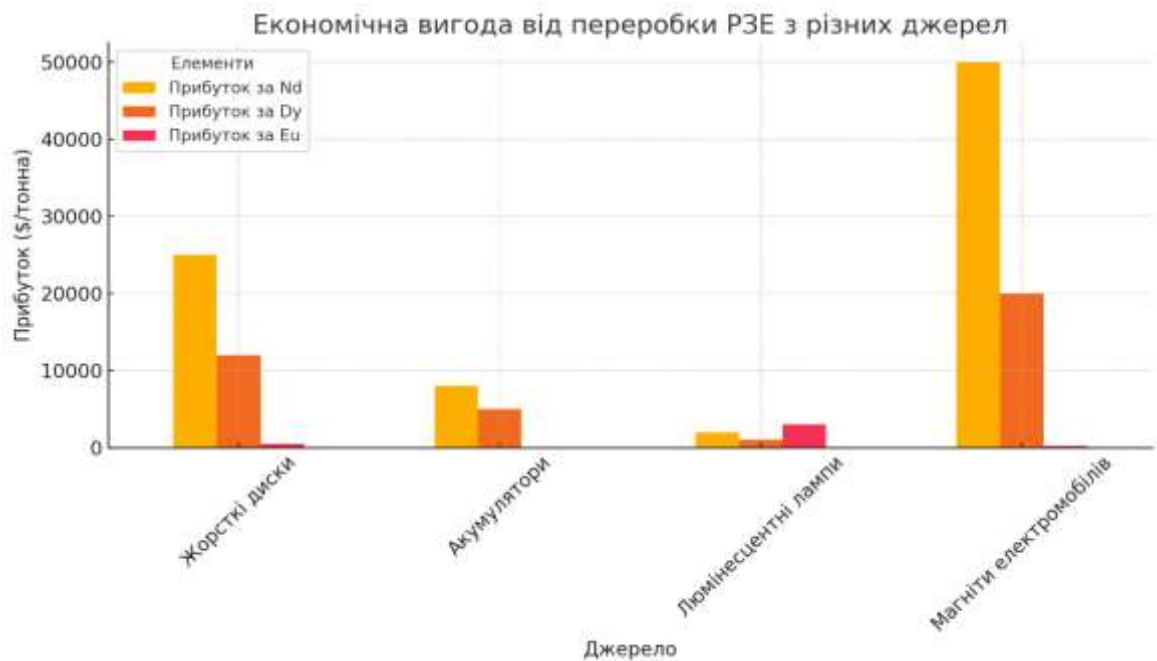


Рис. 2.2. Економічна вигода від переробки РЗЕ з різних джерел

Розвиток переробки рідкоземельних елементів (РЗЕ) і подальше впровадження інноваційних технологій спрямовані на вирішення як екологічних, так і економічних викликів. Одним із ключових аспектів цього процесу є зменшення залежності від традиційного видобутку, який завдає шкоди довкіллю, і формування стабільного ланцюга постачання для критичних галузей, таких як виробництво електромобілів, вітрових турбін та високотехнологічної електроніки.

Останні дослідження демонструють, що переробка РЗЕ з електронних відходів може не лише значно знизити екологічний вплив, але й забезпечити доступ до великого обсягу цінних матеріалів. Наприклад, люмінесцентні

лампи, які містять європій (Eu), тербій (Tb) та ітрій (Y), є джерелом елементів, які важко отримати з первинних джерел. Одночасно жорсткі диски забезпечують доступ до неодиму (Nd) та диспрозію (Dy), що є критично важливими для постійних магнітів[68,69,70].

Майбутнє цієї галузі залежить від впровадження передових методів вилуговування і вилучення РЗЕ. Наприклад, використання іонних рідин, які діють як високоефективні розчинники, дає змогу знизити токсичність процесів і підвищити відновлення елементів. Дослідження з використання полімерних мембран, модифікованих селективними екстрагентами, показали, що їх ефективність може сягати понад 90% для окремих елементів, таких як Nd і Dy. Такі результати є обнадійливими і відкривають можливості для масштабного промислового застосування.

Значний прогрес відбувається також у сфері мікробіологічних методів. Мікроорганізми, такі як бактерії *Acidithiobacillus ferrooxidans* і *Leptospirillum ferrooxidans*, показали здатність до біовилуговування РЗЕ навіть із відходів, які раніше вважалися малоперспективними. Біотехнології дають змогу знизити споживання енергії та хімічних реагентів, водночас зменшуючи негативний вплив на довкілля.

Уряди багатьох країн почали впроваджувати програми підтримки досліджень у сфері переробки РЗЕ. Наприклад, Європейський Союз запустив ініціативу "Horizon Europe", яка включає фінансування проєктів з утилізації електронних відходів для створення замкненого циклу матеріалів. У Японії компанії, такі як Hitachi, створюють автоматизовані лінії для вилучення магнітів із пристроїв, що значно знижує витрати на переробку. Водночас США фінансують дослідження з видобутку РЗЕ з шахтних хвостів і промислових відходів, таких як фосфорний гіпс і червоний шлам[72,73,74].

Економічна ефективність цих процесів підвищується зі зростанням цін на РЗЕ на світовому ринку. Очікується, що до 2030 року економічна вигода від переробки РЗЕ значно зросте, особливо в країнах із високими екологічними стандартами. Це також сприятиме зниженню залежності від монопольного

постачання з таких країн, як Китай, який наразі контролює значну частину глобального ринку РЗЕ.

Формула для оцінки вуглецевого сліду процесу:

$$CF = \sum_{i=1}^n E_i \cdot GWP_i \quad (2.3)$$

де: CF - вуглецевий слід (у кг CO₂ еквівалентів),

E_i – обсяг викидів i -тої речовини (у кг),

GWP_i - потенціал глобального потепління i -тої речовини (безрозмірна величина).

Переробка РЗЕ також є важливим кроком у зменшенні обсягу токсичних відходів. Наприклад, за оцінками, переробка одного тонни електронних відходів може запобігти утворенню до 2 тонн токсичних шахтних хвостів, які залишаються після видобутку. Це особливо важливо в умовах зростаючого виробництва електронних пристроїв, яке до 2035 року може збільшитися на 50%, за прогнозами аналітиків.

Таблиця 2.4

Викиди CO₂ при видобутку та переробці РЗЕ (кг/т)

Елемент	Викиди CO ₂ (видобуток)	Викиди CO ₂ (переробка)	Зменшення викидів
Неодим (Nd)	7000	1500	5500
Диспрозій (Dy)	8000	2000	6000
Європій (Eu)	8500	1800	6700
Ітрій (Y)	6000	1200	4800

Таблиця 2.4 ілюструє значне скорочення викидів CO₂, що досягається шляхом переробки РЗЕ замість видобутку. Найбільший недолік для Європи (Eu), де викиди скорочуються з 8500 кг/т (видобуток) до 1800 кг/т (переробка), що становить економію 6700 кг/т. Неодим (Nd) та диспрозій (Dy) також демонструють значне скорочення викидів, відповідно на 5500 кг/т і 6000 кг/т. Це підкреслює екологічну вигоду переробки, зокрема для критичних елементів, які виготовлені у високотехнологічних пристроях. Незважаючи на прогрес, перед галуззю стоять виклики. Це включає низьку концентрацію РЗЕ

в електронних відходах, складність їх вилучення та високу вартість технологій обробки. Проте розвиток нових методів і глобальна співпраця створюють перспективи для подолання цих перешкод. Зокрема, розробка більш енергоефективних процесів та стандартизація міжнародних методів переробки сприятиме поширенню цих технологій[75,76,77].

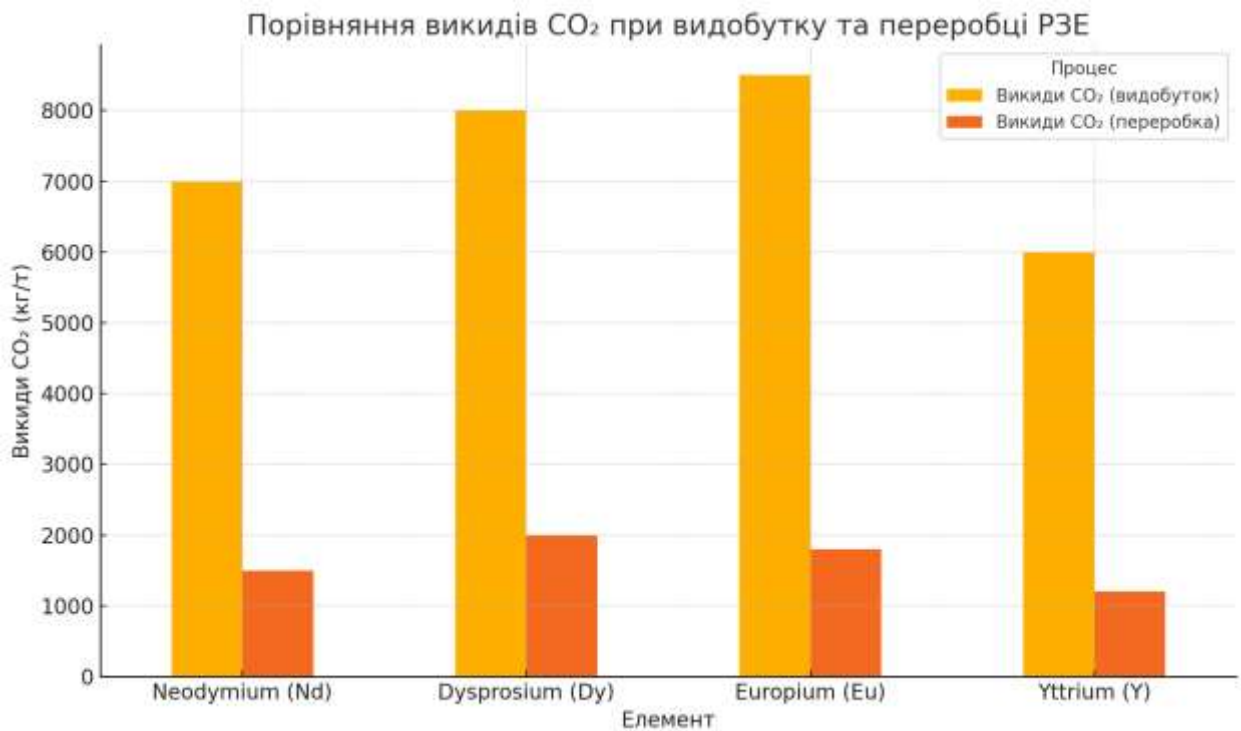


Рис.2.3 Порівняння викидів CO₂ при видобутку та переробці РЗЕ

Таким чином, переробка РЗЕ стає ключовою стратегією для забезпечення сталого розвитку. Вона не лише відповідає викликам сучасного ринку, а й забезпечує значний внесок у збереження довкілля, підвищення економічної стабільності та створення циркулярної економіки. Це не просто технологічний тренд, а необхідність, яка формує майбутнє сучасної індустрії.

Одним із ключових напрямків досліджень є вдосконалення процесів вилучення РЗЕ з різних типів відходів. Наприклад, нещодавні експерименти з використанням електрохімічного вилуговування демонструють перспективи значного підвищення ефективності вилучення неодиму (Nd) та диспрозію (Dy) з постійних магнітів. Використання електрохімічних процесів дозволяє знизити витрати на хімічні реагенти та забезпечити вищу чистоту отриманих матеріалів. Дослідження також підтверджують ефективність комбінованих

підходів, де електрохімічне вилуговування поєднується з механічною сегрегацією компонентів[78,79,80].

Ще одним важливим аспектом є розвиток мікробіологічних технологій. Використання бактерій, які здатні вилучати РЗЕ з відходів за допомогою природних біохімічних реакцій, зменшує негативний вплив на довкілля. Наприклад, застосування *Leptospirillum ferrooxidans* для вилуговування лантанодів з відпрацьованих акумуляторів дозволяє досягти ефективності вилучення понад 70%. Це є важливим кроком у напрямку створення екологічно чистих технологій переробки.

Глобальна інтеграція цих технологій потребує координації зусиль між країнами та промисловими секторами. Європейський Союз активно фінансує програми, спрямовані на створення інфраструктури для збору та переробки електронних відходів. Наприклад, проект EREAN (European Rare Earth Magnet Recycling Network) фокусується на розробці автоматизованих систем для вилучення магнітів із відпрацьованих пристроїв. У США створюються державні програми підтримки переробки РЗЕ, які включають стимулювання досліджень та створення пільгових умов для підприємств, що займаються утилізацією відходів[80,81,83].

Економічна вигода від переробки РЗЕ продовжує зростати. За останніми даними, вартість перероблених матеріалів, таких як Nd і Dy, збільшилася на 30–40% у порівнянні з первинним видобутком. Це робить переробку більш привабливою для інвесторів і сприяє розширенню виробничих потужностей у цій галузі. Наприклад, у Китаї, який залишається лідером у переробці РЗЕ, уже функціонують понад 50 заводів із переробки електронних відходів, що дозволяє забезпечити внутрішній ринок критичними матеріалами.

Перспективи розвитку цієї галузі також пов'язані з вирішенням проблеми балансу між попитом на окремі РЗЕ та їх надлишком. Наприклад, для видобутку неодиму часто утворюється велика кількість лантану (La) і церію (Ce), які не мають такого високого попиту. Переробка відходів дозволяє

вирішити цю проблему, забезпечуючи можливість повторного використання надлишкових матеріалів у нових технологічних процесах.

До 2035 року прогнозується, що переробка електронних відходів стане основним джерелом для отримання таких елементів, як Nd, Dy, Eu та Tb. Це дозволить зменшити залежність від видобутку у геополітично нестабільних регіонах, а також знизити екологічне навантаження на планету. За оцінками експертів, реалізація цих технологій може скоротити викиди CO₂, пов’язані з видобутком РЗЕ, на 70%, що є значним внеском у боротьбу зі зміною клімату.

Таблиця 2.5

Потенціал вилучення РЗЕ за допомогою різних технологій (%)

Технологія	Ефективність вилучення	Зниження витрат на реагенти	Зменшення токсичних відходів
Гідрометалургія	85	20	30
Іонні рідини	90	50	50
Мікробіологія	70	60	70
Електрохімія	95	40	40

Подальший прогрес у цій сфері залежить від інвестицій у дослідження, розробку нових технологій та створення глобальних ініціатив для забезпечення сталого використання РЗЕ. Це дозволить не лише зберегти довкілля, а й створити ефективну систему постачання критичних матеріалів для майбутнього технологічного розвитку.

Таблиця 2.5 та відповідний графік порівнюють ефективність різних технологій вилучення РЗЕ. Електрохімічні методи мають найвищу ефективність вилучення (95%), що робить їх надзвичайно перспективними для масштабної промислової переробки. Іонні рідини забезпечують оптимальний баланс між високою ефективністю (90%) та зниженням витрат на реагенти (50%), що робить їх ідеальними для впровадження в країнах із високими екологічними стандартами.

Мікробіологічні методи демонструють значну перевагу зниження токсичних відходів (70%), що є критичним для регіонів із чутливими екосистемами. Гідрометалургія залишається універсальним методом із більшою ефективністю, але потребує вдосконалення для мінімізації витрат[84,85].

Графіки і таблиці разом підтверджують, що переробка РЗЕ є не лише економічно вигідною, а й екологічно необхідною. Комбінація сучасних технологій і висококонцентрованих джерел, таких як магніти електромобілів і жорсткі диски, забезпечує сталий шлях до задоволення попиту на критичні матеріали при мінімізації впливу на довкілля.

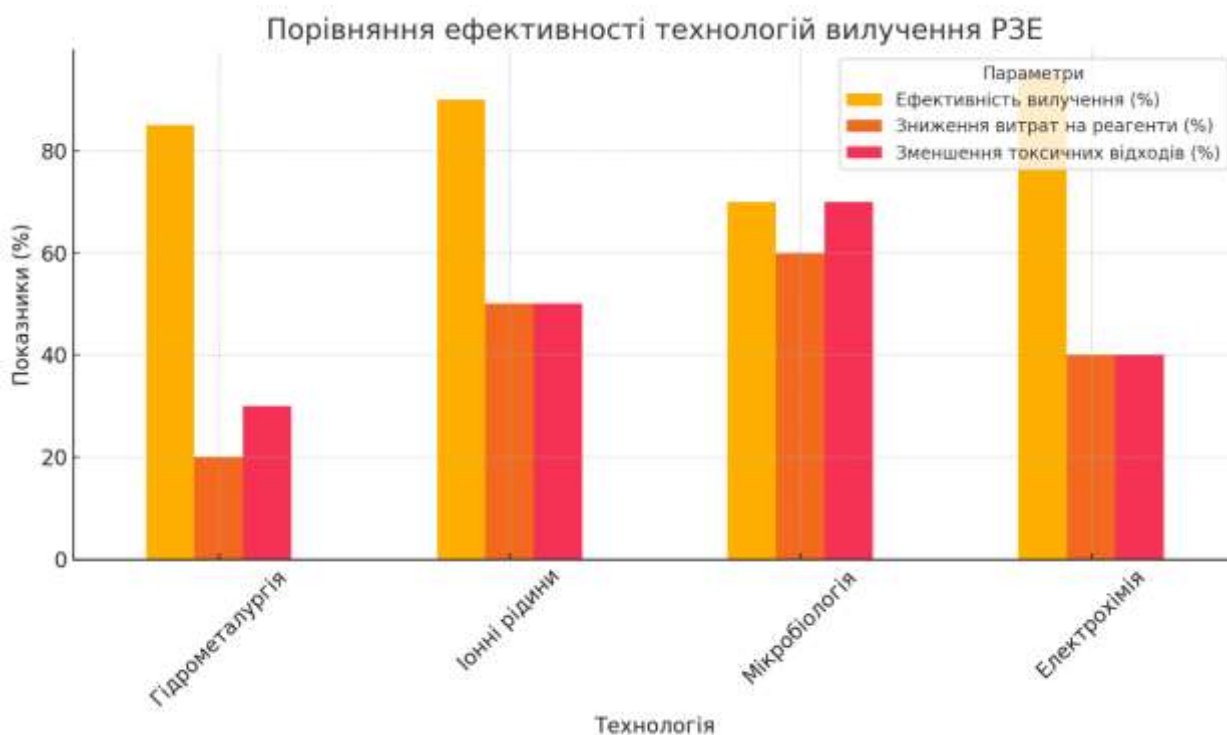


Рис. 2.4 Порівняння ефективності технологій вилучення РЗЕ

Це підкреслює важливість інвестицій у розробку та впровадження інноваційних технологій переробки.

Розширення та вдосконалення процесів переробки рідкоземельних елементів (РЗЕ) стають основою для формування більш стійкої та екологічно відповідальної індустрії. Однією з ключових тенденцій у цьому напрямку є адаптація технологій до локальних умов і потреб різних регіонів, що дозволяє

оптимізувати витрати та підвищити ефективність використання матеріалів[86,87].

Економічна доцільність переробки зростає завдяки постійному вдосконаленню методів вилучення та очищення. Наприклад, впровадження плазмових технологій, які використовуються для обробки електронних відходів, забезпечує швидке плавлення компонентів і виділення РЗЕ з високою чистотою. Такі методи, як "green hydrometallurgy", дозволяють значно знизити екологічний вплив, зменшуючи кількість небезпечних відходів і споживання води. Ці технології вже активно впроваджуються в Японії, де велика увага приділяється екологічним аспектам індустрії.

Крім того, інтеграція штучного інтелекту (ШІ) у процеси переробки відкриває нові горизонти. Алгоритми ШІ використовуються для аналізу складу електронних відходів, оптимізації процесів сортування та виявлення компонентів із високим вмістом РЗЕ. У поєднанні з робототехнікою такі рішення дозволяють автоматизувати складні процеси вилучення магнітів, батарей і люмінесцентних матеріалів, скорочуючи витрати на ручну працю та підвищуючи точність[88,89,90].

Окрім технологічних інновацій, значну роль відіграє формування міжнародних альянсів і співпраці. Наприклад, проекти в межах ініціативи Circular Electronics Partnership залучають державні, приватні та наукові організації для створення глобальної системи управління електронними відходами. У рамках таких програм розробляються стандарти, які регулюють збирання, транспортування та переробку РЗЕ, а також забезпечується фінансування досліджень.

Значний прогрес відбувається і в галузі альтернативних джерел РЗЕ. Наприклад, дослідження з вилучення цих елементів із морських донних осадів демонструють перспективи для створення нового джерела критичних матеріалів. Такі осади містять високі концентрації РЗЕ, зокрема тербію (Tb) та європію (Eu), які є надзвичайно важливими для виробництва LED-дисплеїв і енергоефективних освітлювальних пристроїв. Хоча технології видобутку з

морських осадів ще перебувають на етапі розробки, їх комерціалізація може стати революційним кроком у забезпеченні стабільності ринку РЗЕ[91,92,96].

Ще однією перспективою є вдосконалення методів відновлення РЗЕ з відпрацьованих каталізаторів, які широко використовуються у нафтохімічній промисловості. Каталізatori, що містять лантан (La), цезій (Ce) та ітрій (Y), демонструють високу потенційну вартість для переробки. У Європі проводяться масштабні дослідження з розробки економічно ефективних способів вилучення цих елементів, що може відкрити нові ринки для перероблених матеріалів.

У майбутньому, за оцінками експертів, глобальна індустрія переробки РЗЕ досягне значного масштабу. Очікується, що обсяги переробки до 2040 року можуть забезпечити до 50% світового попиту на критичні матеріали. Це не лише зменшить залежність від первинного видобутку, а й сприятиме зниженню геополітичних ризиків, пов'язаних із постачанням РЗЕ з обмежених джерел.

Одним із важливих аспектів залишається інтеграція переробки РЗЕ у глобальні виробничі ланцюги. Національні уряди і корпорації інвестують у дослідження, які спрямовані на створення замкнених циклів використання матеріалів. Наприклад, компанії, які спеціалізуються на виробництві акумуляторів для електромобілів, активно впроваджують методи рециклінгу, що дозволяють відновлювати літій, кобальт та РЗЕ, зокрема неодим (Nd) і диспрозій (Dy). Це не лише скорочує витрати на видобуток, але й знижує обсяг відходів.

Переробка постійних магнітів із пристроїв, таких як жорсткі диски та двигуни електромобілів, є одним із найбільш ефективних напрямків. Дослідження показують, що до 95% неодиму та диспрозійу можна відновити за допомогою сучасних хімічних методів, таких як електрохімічне вилуговування або селективна кристалізація. Крім того, застосування нових розчинників на основі іонних рідин знижує витрати енергії на 30%, що робить ці процеси економічно привабливими[93,95,97].

Мікробіологічні методи також демонструють високий потенціал. Наприклад, дослідження біовилуговування за допомогою бактерій *Acidithiobacillus ferrooxidans* показали, що до 70% церію (Ce) можна ефективно відновити з відходів люмінесцентних ламп. Це дозволяє знизити використання токсичних реагентів і зменшити утворення небезпечних відходів.

Особливо важливим залишається питання утилізації старих запасів промислових відходів, таких як червоний шлам, шахтні хвости і фосфорний гіпс. У деяких регіонах, наприклад у Маунтін-Пасс (США), ці відходи містять до 5% оксидів РЗЕ, що робить їх перспективним джерелом для відновлення матеріалів. Використання комбінованих механічних і хімічних методів дозволяє досягти високих результатів у вилученні лантаноїдів із цих джерел.

Економічні вигоди від розширення інфраструктури переробки РЗЕ є значними. Аналітики прогнозують, що до 2035 року прибуток від переробки електронних відходів може зрости втричі завдяки збільшенню попиту на рідкоземельні елементи у виробництві електромобілів, зеленої енергетики та сучасних електронних пристроїв. Наприклад, лише в ЄС вартість рециклінгу РЗЕ оцінюється у 5 мільярдів євро на рік, з можливістю подальшого зростання[98,99,100].

Водночас вирішення екологічних викликів, пов'язаних із переробкою, потребує впровадження суворих міжнародних стандартів. Питання безпечної утилізації залишкових матеріалів, які утворюються під час обробки електронних відходів, є ключовим для забезпечення екологічної стійкості. Дослідження, проведені в Німеччині, показують, що модернізація заводів із переробки РЗЕ дозволяє скоротити викиди токсичних речовин на 50% і зменшити споживання енергії на 20%.

Глобальна співпраця між країнами, науковцями і промисловими підприємствами є необхідною для успішного розвитку цієї галузі. Міжнародні консорціуми, такі як European Rare Earth Magnet Recycling Network (EREAN) і американська Critical Materials Institute (CMI), працюють над створенням технологічних платформ і обміном знаннями для підвищення ефективності

процесів. Це дозволяє створювати умови для сталого розвитку та зниження залежності від геополітично нестабільних джерел постачання.

2.1 Критична роль рідкоземельних металів у сучасних технологіях та стійкому розвитку

Рідкоземельні елементи (РЗЕ), що включають 17 металів, у тому числі лантаноїди, скандій та ітрій, звертають особливу увагу за допомогою своїх електронних, магнітних і оптичних властивостей. Ці характеристики роблять їх незамінними для широкого спектра сучасних технологій. РЗЕ знаходять широке застосування в екологічно чистій енергетиці, зокрема у вітрових турбінах, електромобільних двигунах та енергоефективних системах освітлення. Вони активно використовуються в побутовій електроніці, зокрема в екранах, динаміках і ключових компонентах пристроїв, транспорті для каталітичних нейтралізаторів, паливних елементів і легких сплавів, оборонній промисловості, включаючи високоточні боєприпаси, прилади нічного бачення і системи зв'язку[102,106,108].

Особливо важливі магнітні властивості таких елементів, як неодим і диспрозій, які є критичними для створення високоефективних постійних магнітів. Ці магніти мають вирішальне значення для генераторів вітрових турбін та електродвигунів у транспорті. Зростаюча роль РЗЕ в зелених технологіях і високотехнологічних галузях допомогла у розробці більш ефективних і стійких методів їх отримання та розділення. Інтерес до оптимізації цих процесів також обумовлений їхньою значимістю для підтримки глобального переходу до екологічно чистих технологій і забезпечення технологічної незалежності ключових галузей.

Швидке розширення використання побутової електроніки спричинило суттєве збільшення обсягів електронних відходів по всьому світу. Щороку утворюється понад 50 мільйонів тонн таких відходів, а до 2030 року ця кількість може досягти 74,7 мільйонів тонн з подальшим потенційним

зростанням до 2050 року. Електронні відходи, до яких належать викинуті смартфони, комп'ютери, телевізори та інші пристрої, містять широкий спектр цінних матеріалів, включаючи рідкоземельні елементи (РЗЕ)[101,105,109].



Рис. 2.5 Незамінна роль РЗЕ(REEs) в сучасній техніці.

Дослідження свідчать, що концентрація РЗЕ у відходах часто перевищує їхній вміст у природних рудах. Зокрема, жорсткі диски можуть містити до 2500 ppm неодиму та 500 ppm диспрозію, а люмінесцентні лампи – до 20 000 ppm ітрію та 1000 ppm європію. Ця інформація базується на останніх даних, що підкреслюють значення електронних відходів як перспективного джерела рідкоземельних металів[111,112,114].

Відновлення РЗЕ з електронних відходів має подвійний потенціал. По-перше, це забезпечує альтернативне джерело РЗЕ, знижуючи залежність від традиційного видобутку та пов'язані з ним екологічні ризики. По-друге, цей процес підтримує принципи циркулярної економіки, сприяючи мінімізації відходів, збереженню природних ресурсів і сталому розвитку. Однак складний склад електронних відходів і недостатній рівень розвитку технологій переробки створюють значні виклики для широкомасштабного впровадження методів відновлення РЗЕ з цього вторинного ресурсу[116,117,119].

Метою цього огляду є комплексний аналіз виникнення та методів відновлення РЗЕ з електронних відходів. У статті висвітлюються основні аспекти цієї проблематики. Зокрема, обговорюються джерела та фактори розподілу РЗЕ в різних типах електронних відходів, сучасні технології їх відновлення, такі як фізичне розділення, гідрометалургійні й пірометалургійні методи, а також інноваційні екологічні підходи. Наведено приклади успішного відновлення РЗЕ з постійних магнітів і флуоресцентних порошків. Також аналізуються існуючі проблеми й перспективи, підкреслюється необхідність розробки систем управління, вдосконалення технологій і досягнення балансу між ресурсоефективністю та захистом довкілля[120,122,124].

2.2 Характеристики появи рідкоземельних елементів в електронних відходах

Електронні відходи охоплюють різноманітні викинуті електронні пристрої, включаючи комп'ютери, смартфони, телевізори та побутову техніку. У таблиці 2.6 представлено типовий вміст РЗЕ в різних типах електронних відходів.

Таблиця 2.6

Типовий вміст РЗЕ в різних видах електронних відходів

Тип електронних відходів	Основні компоненти	РЗЕ присутні	Концентрація (ppm)
Жорсткі диски	Постійні магніти	Nd, Dy, Pr	2500–15 000
Люмінесцентні лампи	Люмінофори	Y, Eu, Ce, Tb, La	1000–20 000
Смартфони	Екрани, колонки, віброторми	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Y	10–1000
комп'ютери	Друковані плати, жорсткі диски, колонки	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Y	10–1000

Як показано в таблиці 2.6, жорсткі диски та люмінесцентні лампи містять найвищі концентрації РЗЕ, зокрема неодиму, диспрозію, ітрію та європію. Постійні магніти в жорстких дисках, такі як магніти NdFeB (неодим-

залізо-бор), є основним джерелом неодиму та диспрозію [13,22]. З іншого боку, люмінофор у люмінесцентних лампах багатий на ітрій та європій [22,23]. Смартфони, комп'ютери та телевізори також містять різні РЗЕ, хоча й у нижчих концентраціях порівняно з жорсткими дисками та люмінесцентними лампами. РЗЕ в цих пристроях в основному містяться в таких компонентах, як екрани, динаміки та вібраційні двигуни [23,24].

2.2.1 Методи відновлення та вилучення рідкоземельних елементів з електронних відходів

Відновлення РЗЕ з електронних відходів має вирішальне значення для сталого управління ресурсами та зменшення залежності від первинного видобутку. Було розроблено різні методи вилучення та відновлення РЗЕ з електронних відходів, кожна з яких має свої переваги та проблеми.

Як показано на рисунку 2.6, методи охоплюють широкий діапазон принципів екстракції, від механічного розділення до хімічних і біологічних процесів. Вплив цих методів на навколишнє середовище різниться, причому деякі традиційні технології, такі як гідрометалургія та пірометалургія, мають більший вплив на навколишнє середовище через використання небезпечних хімікатів і високе споживання енергії. Навпаки, нові екологічні технології, такі як біовилуговування, надкритична екстракція рідиною, іонна рідинна екстракція та пептиди, отримані з ланмодуліну, пропонують більш екологічні альтернативи за рахунок зменшення використання шкідливих хімікатів і мінімізації споживання енергії[123,125,128].



Рис. 2.6. Огляд методів відновлення РЗЕ з електронних відходів: фізичне розділення, гідрометалургійне вилучення, пірометалургійне вилучення та нові екологічні технології.

2.2.2 Методи фізичного розділення та збагачення

Технології фізичного розділення та збагачення складають важливий перший крок у відновленні РЗЕ з електронних відходів. Ці методи концентрують РЗЕ-вмісні компоненти та відокремлюють їх від інших матеріалів без зміни їхнього хімічного складу, зменшуючи об'єм матеріалу, який вимагає більш інтенсивної хімічної обробки. Щоб краще зрозуміти різні методи фізичного розділення, які використовуються для відновлення РЗЕ з електронних відходів, розглянемо їх основні характеристики, переваги та застосування в таблиці 2.7 [129,30,132].

Як показано в таблиці 2.7, кожен метод має свої особливі принципи, переваги та застосування в процесі відновлення РЗЕ. Зазвичай процес починається з ручного розбирання, після чого проводиться магнітна сепарація для використання магнітних властивостей компонентів, що містять РЗЕ. Потім використовуються методи поділу на основі щільності, і, нарешті, застосовуються методи зменшення розміру, такі як дроблення та подрібнення, з подальшим просіюванням для класифікації матеріалів за розміром для подальшої обробки [51, 52].

Таблиця 2.7

Огляд методів фізичного розділення для відновлення РЗЕ з електронних відходів.

Техніка	Принцип	Переваги	Додатки	Ефективність/Міркування
Ручне розбирання	Ручне розділення REE-вмісних компонентів	Висока точність, підходить для високоцінних компонентів	Відновлення магнітів NdFeB з жорстких дисків	Трудомісткий, але ефективний для цінних деталей
Магнітна сепарація	Розділення на основі магнітних властивостей	Ефективне розділення магнітних матеріалів	Ізоляція магнітів NdFeB від інших електронних відходів	Найбільш ефективний для REE-вмісних магнітних матеріалів
Розділення на основі щільності	Поділ на основі різниці щільності	Може розділяти компоненти з різною щільністю	Гравітаційна сепарація або флотація	Підходить для матеріалів зі значною різницею щільності
Зменшення розміру та просіювання	Зменшення розміру частинок і класифікація за розміром	Підвищує ефективність подальшої обробки	Виділення та класифікація РЗЕ-вмісних матеріалів	Готує матеріали до хімічної обробки, підвищуючи ефективність

Важливість цих методів підкреслюється приголомшливим обсягом глобального утворення електронних відходів, який оцінюється в 20-50 мільйонів метричних тонн на рік, що містить велику кількість технологічно відповідних РЗЕ [47]. Нещодавні дослідження збагачення зразків золи та золи-винесення продемонстрували ефективність сепарації за щільністю, магнітної сепарації та пінної флотації при концентруванні РЗЕ, висновки, які особливо актуальні для обробки електронних відходів [49,50].

Патентний ландшафт для відновлення РЗЕ з відпрацьованого електронного обладнання розкриває різноманітний набір методів, включаючи

гідрометалургію, пірметалургію та біометалургію або біовилуговування [53, 54]. Цей широкий спектр запатентованих методів вказує на значний інтерес та інвестиції в розробку ефективних процесів відновлення, причому методи фізичного розділення відіграють основоположну роль [47].

Застосовуючи ці методи фізичного розділення та збагачення, промисловість переробки електронних відходів може ефективно концентрувати РЗЕ та мінімізувати об'єм матеріалу, який потребує більш інтенсивної хімічної обробки. Це не тільки підвищує ефективність наступних етапів видобутку, але також сприяє загальній стійкості та економічній життєздатності відновлення РЗЕ з електронних відходів[142].

Методи фізичного розділення та збагачення відіграють важливу роль на початкових етапах відновлення РЗЕ з електронних відходів шляхом концентрації компонентів, що містять РЗЕ, і зменшення об'єму матеріалу для подальшої хімічної обробки [51]. Однак ці методи стикаються з проблемами, такими як висока трудомісткість і обмежена застосовність до певних типів електронних відходів [55]. Майбутні дослідження мають надати пріоритет розробці автоматизованих систем сортування, підвищити селективність методів фізичного розділення та дослідити інноваційні способи інтеграції цих методів із передовими процесами хімічної екстракції, сприяючи більш ефективній та стійкій екосистемі відновлення РЗЕ [56 , 57].

2.2.3. Гідрометалургійні технології видобутку

Після фізичного відокремлення та збагачення матеріалів, що містять РЗЕ, з електронних відходів, гідрометалургійні методи зазвичай застосовуються для вилучення та очищення бажаних елементів. Гідрометалургія передбачає використання водних розчинів для вибіркового розчинення та відновлення цільових металів із твердих матеріалів. Ключові етапи гідрометалургійного вилучення РЗЕ включають вилуговування, екстракцію розчинником і осадження або кристалізацію.

Вилуговування — це процес розчинення РЗЕ із збагачених електронних відходів за допомогою кислотних або лужних розчинів. Звичайні вилуговувачі включають сірчану кислоту (H_2SO_4), соляну кислоту (HCl) і азотну кислоту (HNO_3) [58,59]. Вибір вилуговувача залежить від конкретного матеріалу, що містить РЗЕ, і наявності інших елементів, які можуть заважати процесу екстракції. Такі фактори, як час вилуговування, температура та співвідношення твердої речовини до рідини, також відіграють вирішальну роль в оптимізації відновлення РЗЕ.

Після вилуговування екстракцію розчинником часто використовують для селективного відділення та очищення розчинених РЗЕ з розчину вилуговування. Цей процес передбачає використання органічних екстрагентів, які вибірково зв'язуються з іонами РЗЕ, що дозволяє відокремити їх від інших розчинених металів [60]. Загальні екстрагенти, що використовуються в екстракції РЗЕ розчинником, включають ді-(2-етилгексил) фосфорну кислоту (D2EHPA), 2-етилгексил фосфонову кислоту моно-2-етилгексиловий ефір (PC-88A) і трибутилфосфат (TBP) [5].

Нарешті, очищені розчини РЗЕ піддають осадженню або кристалізації для отримання твердих продуктів РЗЕ. Цього можна досягти, регулюючи рН розчину або додаючи осаджувачі, такі як щавлева кислота або бікарбонат амонію [61,62]. Осаджені сполуки РЗЕ потім фільтрують, промивають і прожарюють для отримання високочистих оксидів РЗЕ. У таблиці 7 наведено огляд цих ключових гідрометалургійних методів, що використовуються для вилучення РЗЕ з електронних відходів, включаючи осадження разом із вилуговуванням і екстракцією розчинником [61].

Таблиця 2.8

Огляд гідрометалургійних технологій вилучення РЗЕ з електронних відходів.

Техніка	Принцип	Переваги	Додатки
Кислотне вилуговування	Розчинення РЗЕ за допомогою кислотних розчинів	Висока ефективність вилуговування, селективність	Добування РЗЕ з магнітів NdFeB , люмінофорів

Екстракція розчинником	Селективне розділення РЗЕ з використанням органічних екстрагентів	Висока чистота, ефективне розділення окремих РЗЕ	Очищення розчинів вилуговування, що містять кілька РЗЕ
Опади	Утворення твердих сполук РЗЕ шляхом регулювання рН або додавання осаджувачів	Просто, економічно вигідно	Відновлення РЗЕ у вигляді оксалатів, карбонатів або гідроксидів

Вибір відповідних гідрометалургійних методів залежить від конкретного матеріалу електронних відходів, цільових РЗЕ та бажаної чистоти кінцевих продуктів [63]. Недавні дослідження вийшли за рамки традиційних гідрометалургійних процесів, зосередившись на екологічно стійких та інноваційних методах для покращення рівня відновлення REE, мінімізації впливу на навколишнє середовище та зниження загальних витрат. Ці досягнення включають використання водоростевих сорбентів для стійкого відновлення РЗЕ з електронних відходів [13], застосування різних технологій рідких мембран для ефективного та екологічно чистого вилучення РЗЕ [64], а також дослідження іонних рідин для відновлення РЗЕ при спалюванні вугілля. продукції [65]. Крім того, все більше уваги приділяється включенню відновлення РЗЕ в більш широкі рамки циклічної економіки [66] і розробці методів вилучення цих елементів із низькоякісних і вторинних ресурсів [67]. Ці різноманітні підходи відображають перехід до більш стійких, ефективних та екологічно свідомих методів відновлення РЗЕ.

Таким чином, гідрометалургійні методи відіграють важливу роль у видобутку та очищенні РЗЕ з електронних відходів після фізичного розділення та збагачення. Використовуючи принципи вилуговування, екстракції розчинником і осадження, а також застосовуючи інноваційні та екологічні підходи, індустрія переробки електронних відходів може ефективно відновлювати ці важливі елементи, сприяючи більш стійкій економіці циклічного циклу. Оскільки попит на РЗЕ продовжує зростати, розробка передових гідрометалургійних процесів буде мати вирішальне значення для

забезпечення стабільного та екологічно відповідального постачання цих основних матеріалів.

2.2.4. Пірометалургійні методи видобутку

Пірометалургійні методи, які включають використання високотемпературних процесів для вилучення та очищення РЗЕ з електронних відходів, часто використовуються в поєднанні з гідрометалургійними методами для досягнення оптимальних показників відновлення та чистоти продукту. Основні пірометалургійні процеси, які використовуються для відновлення РЗЕ з електронних відходів, включають випал, плавку та електроліз розплавленої солі.

Випал — це високотемпературний процес, який перетворює РЗЕ-вмісні сполуки в оксиди, що робить їх більш придатними для наступних процесів вилуговування або розділення [68]. Ця техніка особливо корисна для обробки електронних відходів, що містять люмінофор або оксиди REE [69 , 70]. Процес випалу можна проводити в присутності добавок, таких як карбонат натрію (Na_2CO_3) або гідроксид натрію (NaOH), для підвищення ефективності конверсії та селективності [68 , 71].

Після випалу плавлення передбачає плавлення матеріалів електронних відходів при високих температурах для концентрації РЗЕ в розплавленій фазі, яку потім можна відокремити від шлаку. Цей процес часто використовується для відновлення РЗЕ з металевих компонентів електронних відходів, таких як магніти NdFeB [72]. Процес плавлення можна оптимізувати, регулюючи такі параметри, як температура, склад флюсу та відновники, щоб максимізувати відновлення РЗЕ та мінімізувати споживання енергії [73 , 74 , 75].

Іншою важливою пірометалургійною технікою є електроліз розплавленої солі, електрохімічний метод, який використовує високотемпературні розплавлені солі як електроліт для вилучення РЗЕ з електронних відходів [72 , 76]. Цей метод особливо підходить для відновлення

РЗЕ з люмінофорів люмінесцентних ламп, оскільки він може ефективно відокремлювати РЗЕ від кальцієвої та фосфатної матриці [57]. Процес передбачає розчинення матеріалів електронних відходів у ванні з розплавленою сіллю, яка зазвичай складається з фториду літію (LiF) і фторидів РЗЕ, з подальшим електролітичним осадженням РЗЕ на катоді [72 , 77].

У таблиці 2.9 наведено огляд основних пірометалургійних методів, які використовуються для відновлення РЗЕ з електронних відходів, а також їх принципи, переваги та застосування. Незважаючи на переваги цих методів, пірометалургійні процеси стикаються з проблемами, пов'язаними з високим споживанням енергії та потенційним впливом на навколишнє середовище [78, 79]. Щоб вирішити ці проблеми, поточні дослідження зосереджені на розробці більш енергоефективних і екологічно чистих пірометалургійних процесів, таких як використання мікрохвильового нагріву та оптимізація складу флюсу для мінімізації утворення відходів [80].

Таблиця 2.9

Огляд пірометалургійних методів відновлення РЗЕ з електронних відходів.

Техніка	Принцип	Переваги	Додатки
Електроліз розплавленої солі	Електрохімічне виділення РЗЕ з використанням високотемпературних розплавів солей	Ефективне відділення РЗЕ від складних матриць	Відновлення РЗЕ у вигляді оксалатів, карбонатів або гідроксидів
Смаження	Високотемпературне перетворення сполук РЗЕ в оксиди	Покращує ефективність вилугування, забезпечує селективне відновлення	Обробка РЗЕ люмінофорами та оксидами
Виплавка	Розплавлення електронних відходів при високих температурах для концентрації РЗЕ в розплавленій фазі	Забезпечує відновлення металевих компонентів, високу пропускну здатність	Очищення розчинів вилугування, що містять кілька РЗЕ

Використовуючи високотемпературні процеси, такі як випалювання, плавлення та електроліз розплавленої солі, промисловість переробки

електронних відходів може ефективно витягувати РЗЕ з широкого діапазону матеріалів, включаючи люмінофор, оксиди та металеві компоненти. Оскільки попит на стійкі джерела РЗЕ зростає, розробка передових і екологічно чистих пірометалургійних процесів буде важливою для максимізації рівня відновлення та мінімізації впливу на навколишнє середовище, що зрештою сприятиме більш циклічній економіці.

2.2.5. Біовилуговування

Біологічне вилуговування є багатообіцяючою альтернативою звичайним гідрометалургійним процесам, використовуючи мікроорганізми для вилучення РЗЕ з електронних відходів [84]. Цей підхід використовує здатність певних бактерій і грибів розчиняти метали шляхом виробництва органічних кислот та інших метаболітів [85]. Біовилуговування пропонує кілька переваг перед традиційними методами, включаючи менше споживання енергії, скорочене використання хімічних речовин і потенціал для вибіркового відновлення металу [20,80]. Ключові фактори, що впливають на процес біовилуговування, включають температуру, розмір частинок, значення рН, склад середовища та види мікробів [85].

Недавні дослідження продемонстрували ефективність біовилуговування у вилученні РЗЕ з різних потоків електронних відходів. Наприклад, дослідники успішно відновили РЗЕ з люмінофорів люмінесцентних ламп, використовуючи левулінову кислоту, з ефективністю вилуговування, що перевищує 98,7% за оптимальних умов [87]. *Gluconobacter oxydans* показав багатообіцяючі результати у вилученні РЗЕ з відпрацьованих каталізаторів флюїдного каталітичного крекінгу (FCC), з ефективністю вилуговування до 56% у періодичних процесах і 51% у безперервних біореакторних системах [22].

Щоб ще більше підвищити стійкість і економічну ефективність біовилуговування, дослідники вивчають можливість використання сільськогосподарських відходів як субстратів для бродіння. Дослідження

показали, що біорозчинники, отримані з відходів картоплі та кукурудзяної печі, можуть бути ефективними у відновленні РЗЕ, потенційно знижуючи витрати порівняно з процесами на основі глюкози. Техніко-економічний аналіз показав, що установка біовилуговування на основі кукурудзяної печі матиме на 20% нижчі загальні витрати, ніж установка на основі стічних вод картоплі, а установка на основі стічних вод картоплі повинна мати на 18% нижчі загальні витрати порівняно з установкою на основі глюкози [86].

Оптимізація параметрів біовилуговування має вирішальне значення для досягнення високих показників відновлення та селективності РЗЕ. Поточні дослідження зосереджені на підвищенні ефективності процесу шляхом точного налаштування таких факторів, як температура, рН, склад середовища та тривалість [85,88]. Наприклад, дослідження вилуговування червоного шламу показало, що оптимальні умови співвідношення рідини до твердої речовини 40, температура 70 °C і тривалість 60 годин призвели до 100% вилуговування РЗЕ, за винятком Sc [87].

Незважаючи на багатообіцяючий потенціал біовилуговування як технології екологічного вилучення РЗЕ, проблеми залишаються. Вони включають підвищення ефективності вилуговування для різних матеріалів, що містять РЗЕ, і розробку мікробних штамів, адаптованих до конкретних субстратів [85 , 89]. Майбутні дослідницькі зусилля повинні бути зосереджені на вирішенні цих проблем і розширенні процесів біовилуговування для промислового застосування [90]. Розвиток безперервних систем культивування організмів, що виробляють кислоти, таких як *G. oxydans*, може забезпечити органічні кислоти в кількостях і зі швидкістю, корисними для комерційного біовилуговування [86]. Крім того, вивчення потенціалу різних мікроорганізмів для біовилуговування РЗЕ з різних твердих матриць може відкрити нові шляхи для ефективного відновлення та переробки РЗЕ [91]. Подолавши ці перешкоди, біовилуговування може допомогти зменшити ризик постачання та залежність від ринку РЗЕ, одночасно сприяючи більш стійким та екологічно чистим методам економіки [85,89].

Біовилуговування, як нова «зелена» технологія, пропонує багатообіцяючу альтернативу звичайним гідрометалургійним процесам відновлення РЗЕ з електронних відходів. Використовуючи силу мікроорганізмів, біовилуговування потенційно може зменшити споживання енергії, звести до мінімуму використання небезпечних хімікатів і забезпечити вибіркове відновлення цільових металів. Однак ефективність процесів біовилуговування залежить від різних факторів, таких як тип електронних відходів, мікробні штами та параметри процесу. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на оптимізації умов біовилуговування, розробці мікробних консорціумів, адаптованих до конкретних потоків електронних відходів, і дослідженні потенційної синергії між біовилуговуванням та іншими стійкими технологіями, такими як біосорбція або біовідновлення, для подальшого підвищення ефективності та селективності відновлення REE з е-відходи

2.2.6. Надкритична флюїдна екстракція

Надкритична рідинна екстракція (SFE) — це інноваційна технологія, яка використовує рідини вище критичних точок для вилучення РЗЕ з електронних відходів. Найбільш часто використовуваною рідиною є надкритичний діоксид вуглецю ($scCO_2$), який пропонує ряд переваг, включаючи низьку токсичність, негорючість і легке відділення від екстрагованих компонентів [92].

SFE було успішно застосовано для відновлення РЗЕ з люмінофорів люмінесцентних ламп [93], магнітів NdFeB [72] та NiMH батарей [94]. Висока селективність і ефективність SFE в поєднанні зі зниженим впливом на навколишнє середовище роблять його перспективною технологією екологічного вилучення РЗЕ з електронних відходів [93 , 94].

Рисунок 2.7 ілюструє процес відновлення РЗЕ з електронних відходів за допомогою надкритичної рідинної екстракції. Попередньо оброблені частинки електронних відходів вводяться в екстракційний реактор (Е). CO_2 перетворюється на надкритичний CO_2 ($scCO_2$) шляхом підвищення тиску за

допомогою насоса високого тиску та нагрівання за допомогою нагрівача CO_2 . Всередині екстракційного реактора scCO_2 взаємодіє з частинками електронних відходів, вибірково розчиняючи та екстрагуючи РЗЕ. Потім scCO_2 , насичений РЗЕ, транспортується до сепаратора (S), де зниження тиску викликає осадження РЗЕ. Газоподібний CO_2 відновлюється, зріджується та повертається назад у систему. Добуті РЗЕ збираються для подальшої обробки.

Оптимізація параметрів процесу, таких як тиск, температура та час екстракції, має вирішальне значення для досягнення високої швидкості відновлення та чистоти РЗЕ [94]. Наприклад, дослідження вилучення РЗЕ з магнітів NdFeB показало, що підвищення тиску з 15 МПа до 25 МПа при постійній температурі 60 °C підвищує ефективність вилучення з 70% до 95% [72]. Ще однією перевагою SFE є його здатність регулювати властивості розчинника scCO_2 шляхом введення співрозчинників або хелатуючих агентів. Цей підхід може додатково підвищити селективність та ефективність вилучення РЗЕ. Наприклад, додавання три-н-бутилфосфату (ТБФ) як співрозчинника покращило екстракцію РЗЕ з люмінофорів люмінесцентних ламп, досягнувши рівня відновлення до 98% [93].

Незважаючи на багатообіцяючий потенціал SFE для відновлення REE з електронних відходів, залишаються проблеми щодо оптимізації процесу та розширення для промислового застосування. Майбутні дослідження повинні бути зосереджені на вивченні механізмів екстракції, розробці нових співрозчинників і хелатуючих агентів, а також на розробці безперервних систем SFE для великомасштабного відновлення РЗЕ з різних потоків електронних відходів.

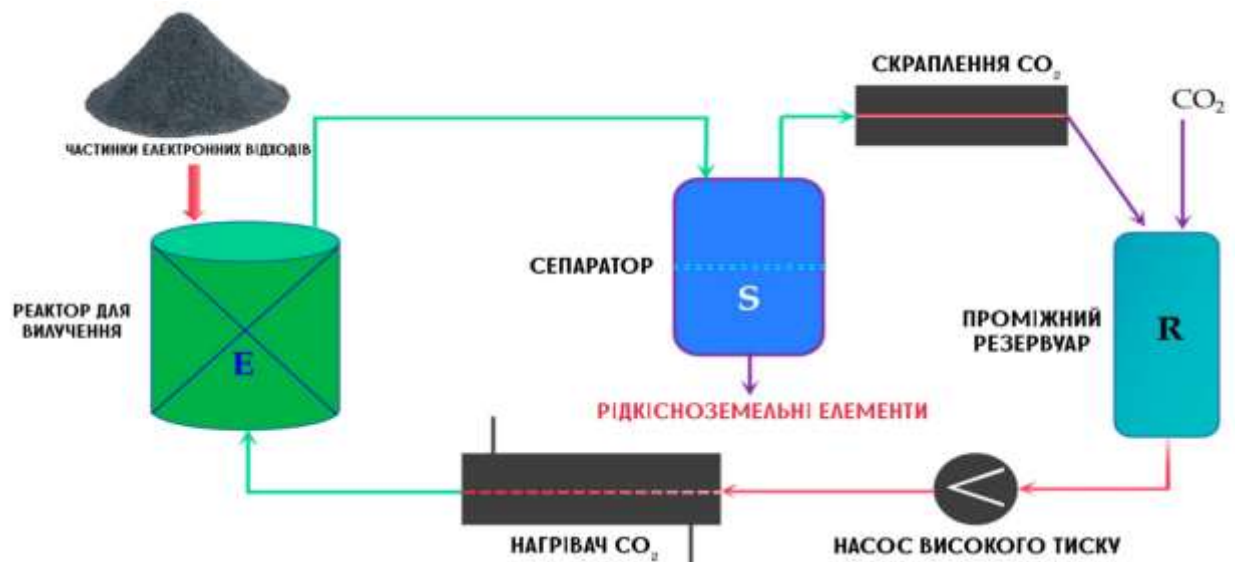


Рис. 2.7 Схематична діаграма екстракції рідкоземельних елементів надкритичною рідиною з електронних відходів.

2.2.7. Іонна рідинна екстракція

Іонні рідини (ІР) — це клас солей з низькою температурою плавлення, які привернули увагу як екологічно чисті альтернативи звичайним органічним розчинникам у процесах екстракції РЗЕ. ІР володіють унікальними властивостями, такими як низька летючість, висока термічна стабільність і регульована селективність, що робить їх добре придатними для селективного вилучення РЗЕ з фільтратів електронних відходів [95].

Рисунок 2.8 ілюструє процес відновлення РЗЕ з електронних відходів за допомогою іонної рідинної екстракції. Процес починається з кислотного вилуговування частинок електронних відходів, у результаті чого РЗЕ та інші домішки розчиняються у водній фазі. Отриманий фільтрат, що містить суміш іонів рідкоземельних елементів та іонів домішок, потім приводиться в контакт з іонною рідкою фазою. Отриманий фільтрат, що містить суміш іонів рідкоземельних елементів та іонів домішок, потім приводиться в контакт з іонною рідкою фазою. Під час процесу екстракції іони REE вибірково переносяться з водної фази в іонну рідку фазу, тоді як більшість іонів домішок залишається у водній фазі. Ця селективна екстракція обумовлена унікальними

властивостями іонних рідин, такими як їх регульована селективність щодо іонів REE [96]. Ключові фактори, що впливають на ефективність і селективність екстракції, включають значення рН, температуру та концентрацію іонної рідини [97].

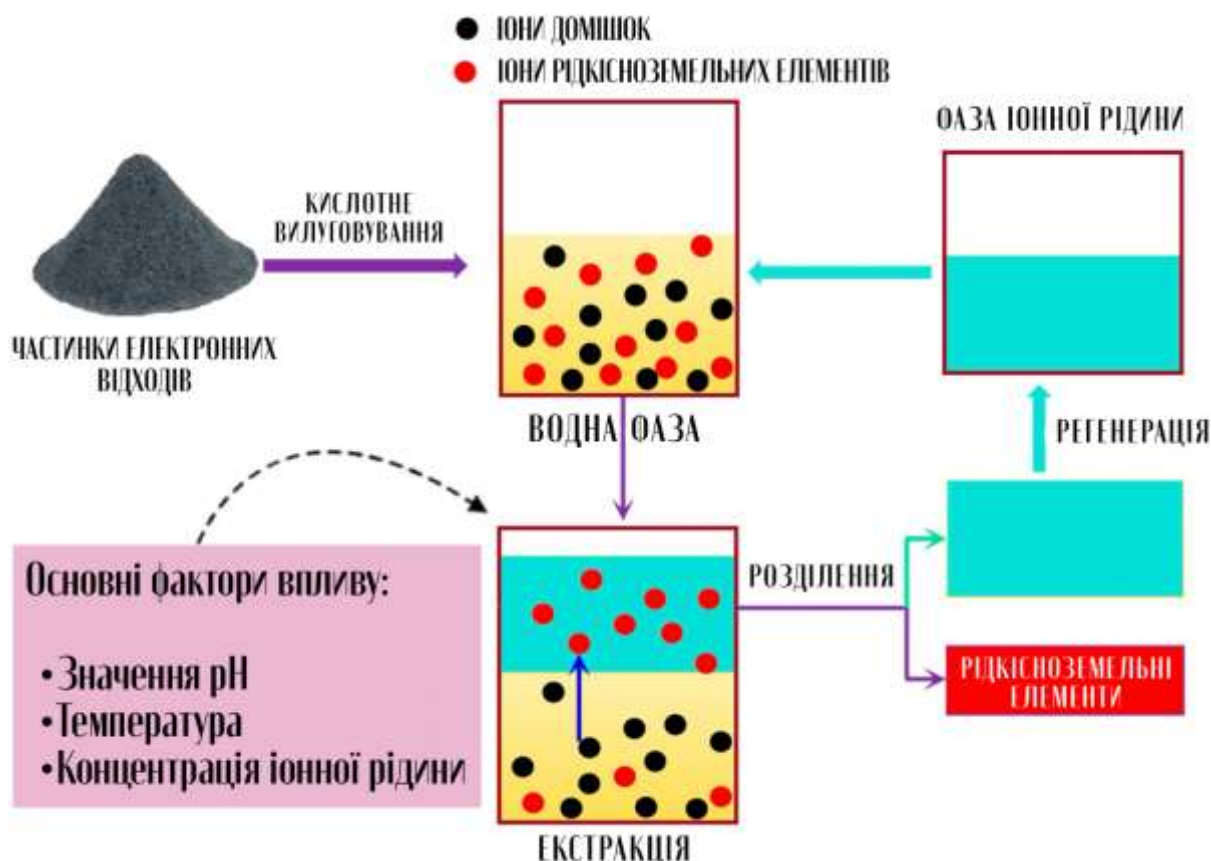


Рис. 2.8 Схематична діаграма іонної рідинної екстракції рідкоземельних елементів з електронних відходів.

Після екстракції іонна рідка фаза, збагачена РЗЕ, проходить процес поділу для відновлення концентрованих РЗЕ. Регенована іонна рідина потім повертається на стадію екстракції, мінімізуючи утворення відходів і підвищуючи екологічну стійкість процесу [96].

Нещодавні дослідження досліджували використання різних ІЛ для відновлення REE з магнітів NdFeB і люмінофорів люмінесцентних ламп. Наприклад, Dupont et al. [98] продемонстрували успішне вилучення неодиму та диспрозію з фільтратів магнітів NdFeB з використанням іонної рідини біс(трифторметилсульфоніл)іміду бетанію ($[\text{Hbet}][\text{Tf}_2\text{N}]$). Цей ІЛ показав перспективу завдяки своїй здатності вибірково витягувати РЗЕ за допомогою

механізму протонного обміну, що робить його ефективним навіть у більш м'яких умовах порівняно з традиційними високотемпературними процесами.

Подібним чином повідомлялося про високу ефективність вилучення європію та ітрію з люмінофорних фільтратів люмінесцентних ламп з використанням різних іонних рідин. Наприклад, дослідження продемонструвало виділення ітрію та європію з порошку відходів люмінесцентних ламп за допомогою нерозбавлених тіоціанатних іонних рідин, зокрема тригексил(тетрадецил)фосфонійтіоціанат ($[C_{101}][SCN]$) і трикаприлметиламонійтіоціанат ($[A_{336}][SCN]$), з $[C_{101}][SCN]$ демонструючи найкращу продуктивність екстракції через протитечійний процес екстракції [99]. В іншому дослідженні використовувалася іонна рідка мембрана з підтримкою, що містить суміш іонної рідини імідазолію, трибутилфосфату (TBP) і D2EHPA для селективного вилучення іонів ітрію з відходів люмінесцентних ламп, оптимізуючи умови для досягнення високої ефективності вилучення [100].

Таким чином, іонна рідинна екстракція є багатообіцяючою зеленою технологією для відновлення РЗЕ з електронних відходів. Завдяки своїм унікальним властивостям і регульованій вибірковості іонні рідини пропонують більш екологічну та ефективну альтернативу звичайним процесам екстракції розчинником. Оскільки дослідження в цій галузі продовжують прогресувати, іонна рідинна екстракція готова зіграти значну роль у сталому відновленні критичних РЗЕ з електронних відходів.

2.2.8. Пептиди, отримані з ланмодуліну

Пептиди, отримані з ланмодуліну, є новою біотехнологією, яка привернула значну увагу завдяки своїй високій селективності щодо РЗЕ, потенціалу регенерації та стійкості. Цей підхід імітує функцію білка ланмодуліну, використовуючи простіші короткі пептиди, які легше маніпулювати та оптимізувати [101]. Серед цих пептидів LanM₁, отриманий з

петлі EF-hand I ланмодуліну, показав особливо багатообіцяючі результати з точки зору його сильної спорідненості зв'язування з РЗЕ як у розчині, так і при іммобілізації на твердих матрицях [102 , 103].

Недавні дослідження продемонстрували застосування нового біосорбенту MNP-LanM для селективного розділення та відновлення РЗЕ з потоків відходів. Цей біосорбент іммобілізує Lanmodulin-SpyCatcher (LanM-Spycatcher) на поверхні функціоналізованих SpyTag магнітних наночастинок (MNP). Схема процесу біосорбції MNP-LanM для селективного відновлення РЗЕ проілюстрована на рисунку 2.9. Біосорбент MNP-LanM використовує сильну афінність зв'язування пептидів, отриманих з ланмодуліну, для вибіркової адсорбції та концентрації РЗЕ зі складних потоків відходів, таких як фільтрат вугільної золи та геотермальний розсіл. Біосорбент продемонстрував чудові робочі характеристики, включаючи високу адсорбційну активність, швидку кінетику адсорбції, ефективну десорбцію, відмінну селективність щодо РЗЕ в присутності різних не РЗЕ, підвищену стабільність, можливість повторного використання та ефективне магнітне розділення. Ефективність цього біосорбенту була продемонстрована вражаючим 967-кратним збільшенням чистоти РЗЕ, що підкреслює його потенціал як сталого та ефективного методу видалення РЗЕ з потоків відходів.

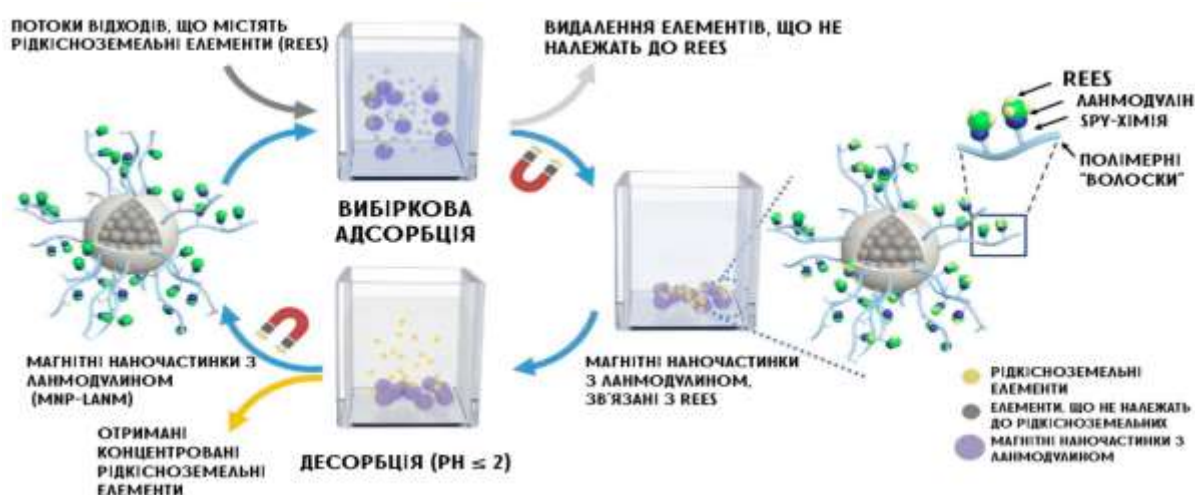


Рис. 2.9. Схема процесу біосорбції MNP-LanM для селективного відновлення РЗЕ. [102].

Розробка пептидів, отриманих з ланмодуліну, для відновлення РЗЕ продовжує просуватися, дослідники вивчають різні методи іммобілізації та оптимізації пептидних послідовностей. Верма та ін. [103] досліджували ефективність LanM1 для зв'язування РЗЕ як у розчині, так і на поверхні. У дослідженні використовувалися кілька аналітичних методів, включаючи круговий дихроїзм (КД), ядерний магнітний резонанс (ЯМР), моделювання молекулярної динаміки (МД), ізотермічну калориметрію з титруванням (ІКТ) і мікробаланс кристалів кварцу з розсіюванням (МКК-Р), щоб охарактеризувати LanM₁, спорідненість зв'язування з різними РЗЕ, такими як Ce(III), Nd(III), Eu(III) та Y(III). Дослідження показали, що LanM₁ демонструє сильнішу спорідненість зв'язування REE порівняно з його шифрованою версією як у розчині, так і в іммобілізованому стані, навіть за умов низького рН. Ці висновки підкреслюють потенціал пептидів, отриманих з ланмодуліну, для передових технологій розділення у відновленні РЗЕ з електронних відходів та інших джерел.

Ці ідеї сприяють поточній розробці біоінспірованих стратегій відновлення РЗЕ, підкреслюючи важливість дизайну пептидів та методів іммобілізації для оптимізації селективності та ефективності. Зосередження уваги на поверхнево-зв'язаних пептидах є особливо актуальним для розробки практичних систем розділення та відновлення РЗЕ з потоків відходів.

Оскільки дослідження продовжують просуватися в області пептидів, отриманих з ланмодуліну, стає очевидним, що ці біомолекули мають потенціал для революції у відновленні РЗЕ з електронних відходів та інших низькосортних джерел. Висока селективність, потенціал регенерації та сумісність з різними методами іммобілізації роблять пептиди, отримані з ланмодуліну, перспективною зеленою технологією для розробки передових систем розділення. Майбутні дослідницькі зусилля мають бути зосереджені на подальшій оптимізації пептидних послідовностей, дослідженні нових методів іммобілізації та розширенні цих технологій для промислового застосування. З постійним прогресом у цій галузі пептиди, отримані з ланмодуліну, готові

зіграти вирішальну роль у вирішенні зростаючої потреби в сталому та ефективному відновленні РЗЕ з електронних відходів і не тільки [103].

2.3. Порівняння методів відновлення РЗЕ

Щоб полегшити вибір та оптимізацію відповідних методів вилучення РЗЕ для конкретних застосувань, важливо порівняти різні методи з точки зору їх ефективності, чистоти та обмежень. У таблиці 2.10 наведено детальне порівняння цих методів відновлення, враховуючи такі ключові аспекти, як відсоток відновлення, відновлена форма, вплив на навколишнє середовище, використання енергії, економічна ефективність та переваги/проти.

Таблиця 2.10

Порівняння методів відновлення РЗЕ з електронних відходів

Метод	Відновлення/%	Відновлена форма	Вплив	Використання енергії	Економічність	Плюси/Мінуси
Традиційна гідрометалургія	80–99%	Солі металів, чисті метали	Помірні хімічні відходи	Помірний	Високий	+Висока ефективність –Хімічно інтенсивний
Біовилуговування	40–90%	Іони металів у розчині	Низький	Низький	Помірний	+ Екологічно чистий – Забирає багато часу
Екстракція надкритичної рідини	80–95%	Металокомплекси	Низьке утворення відходів	Високий	Помірний	+ Висока чистота – Потрібен високий тиск
Іонна рідинна екстракція	85–98%	Іони металів в іонній рідині	Низька летючість, багаторазове використання	Низький	Висока початкова вартість	+ Вибіркова екстракція – Висока вартість іонних рідин
Пірометалургія	80–95%	Металеві сплави, чисті метали	Велике споживання енергії, викиди	Дуже високий	Помірний	+ Висока пропускну здатність – Високе споживання енергії

Різні методи вилучення РЗЕ демонструють значні відмінності щодо ефективності, чистоти та обмежень. Традиційна гідрометалургія може досягти високих показників відновлення та чистоти, але стикається з такими проблемами, як високе споживання хімікатів та утворення кислих стічних вод [108]. Біовилуговування є відносно екологічним, але страждає від повільних процесів і обмеженої чистоти продукту [109]. У той час як надкритична рідинна екстракція та іонна рідинна екстракція можуть давати РЗЕ високої чистоти, вони обмежені вимогами високого тиску та вартістю іонних рідин відповідно [110]. Пірометалургія пропонує високі показники відновлення, але є енергоємною та створює ризики шкідливих викидів [111]. Ефективність і застосовність методів фізичного розділення залежить від типу відходів.

Враховуючи ці фактори, важливо всебічно оцінити переваги та недоліки кожного методу та оптимізувати їх для конкретних застосувань при виборі відповідних методів вилучення РЗЕ. Майбутні дослідження повинні бути зосереджені на розробці більш ефективних, екологічно чистих і рентабельних нових процесів екстракції [112]. Одночасно необхідно створити та вдосконалити системи відновлення та нормативні акти для сприяння індустріалізації та розширенню переробки РЗЕ, досягнення синергічного розвитку використання ресурсів та захисту навколишнього середовища [113].

Приклади відновлення рідкоземельних елементів із типових електронних відходів

Відновлення РЗЕ з електронних відходів має вирішальне значення через їхню критичну роль у сучасних технологіях та вплив видобутку на навколишнє середовище. У цьому розділі розглядаються тематичні дослідження, спрямовані на відновлення РЗЕ з відходів постійних магнітів і відходів флуоресцентного порошку, двох найбільш перспективних джерел електронних відходів для відновлення РЗЕ.

2.3.1. Відходи постійних магнітів: багате джерело РЗЕ

Відпрацьовані постійні магніти, особливо магніти типу NdFeB, є цінним джерелом рідкоземельних елементів, таких як неодим і диспрозій. Завдяки високій концентрації цих елементів у відходах та зростаючому попиту на магніти NdFeB у галузях, що стрімко розвиваються, як-от виробництво вітрових турбін та електромобілів, відпрацьовані магніти стають перспективним об'єктом для відновлення РЗЕ. Окрім їхньої економічної цінності, переробка таких магнітів сприяє зменшенню екологічного впливу, пов'язаного з первинним видобутком руд, та мінімізує ризики, пов'язані з перебоями у постачанні рідкоземельних металів.

Різноманітні методи відновлення рідкоземельних елементів із відпрацьованих постійних магнітів були ретельно досліджені, кожен із них має свої унікальні переваги та виклики. Порівняння цих методів, яке включає оцінку ефективності, екологічного впливу та потенціалу для масштабування, надає цінну інформацію для вибору найоптимальніших підходів до переробки таких відходів.

Таблиця 2.11

Порівняння методів відновлення РЗЕ з відпрацьованих постійних магнітів.

Метод	Ефективність	Вплив на навколишнє середовище	Масштабованість	Приклад
Традиційна гідрометалургія	Високий	Високий	Встановлено	Процес MSX (99,5% чистота, >95% відновлення)
Біовилуговування	Помірний	Низький	Розвиток	Біовилуговування <i>Aspergillus niger</i> (1,37 мг/л РЗЕ)
Надкритична флюїдна екстракція	Високий	Низький	Лабораторні ваги	SCFE з фосфорорганічними реагентами (ТЕР, ТВР, ТВРО, ТОРО)
Майже безвідходна валоризація	Високий	Низький	Розвиток	Валоризація антимікробними кульками (87,21% інгібування)

Дослідження, наведені в цьому розділі, ілюструють значний потенціал інноваційних методів, таких як екстракція надкритичної рідини, біовилуговування та майже безвідходна валоризація, у забезпеченні високої ефективності відновлення та зменшення впливу на навколишнє середовище. Водночас кожен із цих підходів стикається з певними викликами, що стосуються масштабованості, оптимізації процесів та економічної обґрунтованості.

Традиційні гідрометалургійні методи демонструють високу чистоту та рівень відновлення, але їхній вплив на екологію залишається значною проблемою. Екологічніші підходи, такі як біовилуговування та майже безвідходна валоризація, мають перспективу, однак їхня ефективність і придатність для масштабного впровадження все ще потребують доопрацювання. Методи екстракції надкритичної рідини дали багатообіцяючі результати на етапі лабораторних випробувань, але їхнє промислове використання поки що залишається недоведеною.

Остаточний вибір методу для відновлення рідкоземельних елементів із відпрацьованих постійних магнітів залежить від оптимального співвідношення між ефективністю, екологічною стійкістю та економічною доцільністю. Подальший розвиток цих технологій, їхнє вдосконалення, а також створення нових гібридних процесів відіграватимуть ключову роль у забезпеченні сталого відновлення РЗЕ.

Висновки до розділу 2:

У цьому розділі було проведено комплексний аналіз і порівняння методів переробки та вилучення рідкоземельних елементів (РЗЕ), акцентуючи увагу на їхніх екологічних аспектах, ефективності, економічній доцільності та впливі на довкілля. Розглянуто ключову роль РЗЕ у сучасних технологіях, таких як виробництво електромобілів, вітрових турбін, електроніки, енергоефективного освітлення та оборонної промисловості. Відзначено

незамінні магнітні, оптичні та хімічні властивості РЗЕ, які забезпечують їх критичність для розвитку стійких технологій.

Дослідження продемонструвало значні екологічні ризики традиційного видобутку РЗЕ, зокрема утворення токсичних і радіоактивних відходів, що обумовлює необхідність пошуку більш екологічних способів отримання цих елементів. Одним із перспективних джерел РЗЕ визначено електронні відходи, такі як жорсткі диски, магніти NdFeB, люмінесцентні лампи та інші пристрої. Було встановлено, що концентрація РЗЕ в електронних відходах перевищує їхній вміст у природних рудах.

Розглянуто та проаналізовано різні методи вилучення РЗЕ, зокрема традиційні гідрометалургійні та пірометалургійні підходи, а також інноваційні технології, включаючи біовилуговування, надкритичну флюїдну екстракцію, іонну рідинну екстракцію та використання пептидів. Показано, що інноваційні методи мають переваги у зниженні екологічного навантаження та підвищенні ефективності вилучення. Наприклад, переробка електронних відходів дозволяє скоротити викиди CO₂ на 50-70% у порівнянні з традиційним видобутком. Економічний аналіз показав значний потенціал прибутковості, особливо для переробки магнітів NdFeB та люмінесцентних ламп, які містять високі концентрації РЗЕ.

У ході дослідження проведено порівняльний аналіз методів переробки, враховуючи їх ефективність, екологічний вплив, вартість і можливість масштабування. Надано рекомендації щодо впровадження інноваційних підходів, таких як надкритична флюїдна екстракція (SFE), іонна рідинна екстракція та пептидні технології. Окрему увагу приділено необхідності інвестування у дослідження нових технологій, розвитку інфраструктури для переробки електронних відходів та розширення практик циркулярної економіки.

Розроблено висновки про доцільність інтеграції переробки РЗЕ у глобальні виробничі ланцюги для формування циркулярної економіки. Це дослідження підтверджує, що переробка електронних відходів є важливим

кроком до сталого розвитку та зменшення залежності від традиційного видобутку РЗЕ. Інноваційні методи, такі як біовилуговування, SFE, іонна рідинна екстракція та технології на основі ланмодуліну, мають значний потенціал для розширення та комерціалізації. Водночас наголошено на необхідності подальших інвестицій у дослідження, стандартизацію методів і розвиток інфраструктури для забезпечення стабільного постачання РЗЕ та мінімізації їхнього впливу на довкілля.

РОЗДІЛ 3

ІННОВАЦІЙНІ ТА ЕКОЛОГІЧНО СТІЙКІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВІДХОДІВ

3.1. Покращені процеси вилуговування та екстракції

Прогрес у відновленні рідкоземельних елементів із відходів флуоресцентних порошків досягнуто завдяки дослідженню різних підходів, спрямованих на підвищення ефективності вилучення, селективності процесів і екологічної стійкості технологій. Нещодавні роботи демонструють, що оптимізація параметрів вилуговування, таких як концентрація кислоти та температура, може суттєво покращити рівень відновлення РЗЕ. Наприклад, у дослідженнях було використано методи машинного навчання для налаштування процесу вилуговування, що включало регулювання таких параметрів, як розмір частинок. Це дозволило значно підвищити ефективність вилучення РЗЕ з відпрацьованих люмінесцентних ламп.

Серед сучасних підходів особливо перспективною є іонна рідинна екстракція, яка забезпечує високу селективність у відновленні рідкоземельних металів. Біфункціональні іонні рідкі екстрагенти (Bif-ILE) показали відмінні результати, досягнувши рівня відновлення до 95,2% РЗЕ з імітованих систем відходів флуоресцентних порошків. У ході дослідження використовувалися екстрагенти, такі як [A336][P204] і [A336][P507], за умов протитечійної екстракції при заданих фазових співвідношеннях і рівнях рН. Це підкреслює потенціал Bif-ILE як ефективних засобів для розділення та переробки рідкоземельних металів із вторинних ресурсів.

3.2. Біогідрометалургія: сталий підхід

Біогідрометалургія, що ґрунтується на використанні активності мікроорганізмів для відновлення рідкоземельних елементів (РЗЕ), пропонує

екологічно безпечну альтернативу традиційним технологіям. Цей підхід сприяє досягненню цілей циркулярної економіки, знижуючи залежність від агресивних хімічних речовин та енергоємних процесів. Одним із ключових аспектів біогідрометалургії є мікробне біовилуговування, під час якого мікроорганізми сприяють вилученню РЗЕ із відходів. Автотрофні та гетеротрофні мікроорганізми застосовуються для генерування кислот, що розчиняють метали з промислових залишків та електронних відходів, таких як порошок люмінесцентних ламп і відпрацьовані каталізатори. Цей метод продемонстрував ефективність у зменшенні впливу на навколишнє середовище порівняно з хімічними процесами.

Процеси відновлення РЗЕ з промислових відходів за допомогою біогідрометалургії активно досліджуються. Наукові роботи показали перспективи використання специфічних мікроорганізмів для вилуговування РЗЕ із джерел відходів, таких як електронні пристрої та фосфорні порошки, багаті на церій, європій і ітрій. Наприклад, експеримент із використанням грибка *Aspergillus niger* СЕСТ2807 для біовилуговування РЗЕ з порошку флуоресцентного люмінофору підтвердив ефективність цього підходу. Результати дослідження засвідчили здатність *A. niger* успішно вилучати РЗЕ як у періодичних, так і в напівбезперервних системах, відкриваючи перспективи використання грибкового біовилуговування як сталого методу переробки промислових відходів.

Інше дослідження запропонувало масштабовану мікробну платформу для вилуговування РЗЕ з відходів із застосуванням мезофільної метилотрофної бактерії *Methylobacterium extorquens* АМ₁. Експеримент продемонстрував, що цей мікроорганізм здатний використовувати електронні відходи як єдине джерело РЗЕ. Мікробну платформу було масштабовано до 10 літрів із стабільним виходом металів, що підтверджує її потенціал для промислового впровадження.

Біогідрометалургія характеризується меншою енергоємністю та зниженим рівнем забруднення в порівнянні зі звичайними методами, що

робить її життєздатним варіантом для сталого видобутку й переробки РЗЕ. Використання цього підходу допомагає зменшити екологічний слід, пов'язаний із видобутком рідкоземельних металів. Проте для промислового застосування необхідно оптимізувати біогідрометалургійні процеси, вирішивши проблеми ефективності та селективності вилучення РЗЕ. Перспективними напрямками для подальших досліджень є розробка сучасних біореакторів і виявлення мікроорганізмів із високою здатністю до вилуговування й специфічністю до РЗЕ.

3.3. Проблеми та можливості у відновленні РЗЕ з відходів флуоресцентного порошку

Відновлення рідкоземельних елементів (РЗЕ) з відходів флуоресцентного порошку є одночасно викликом і можливістю. Попри успіхи у створенні ефективних та екологічних методів вилучення, залишаються труднощі, пов'язані з масштабованістю процесів та їх економічною доцільністю. Однією з основних проблем є неоднорідність складу відходів, яка впливає на ефективність та селективність відновлення. Впровадження передових методів характеристик і попередньої обробки відходів може допомогти краще зрозуміти їхній склад, що дозволить застосовувати більш точні підходи до вилучення.

Ще однією важливою перешкодою є інтеграція та оптимізація процесу, щоб забезпечити як технічну, так і економічну життєздатність відновлення РЗЕ. Це потребує цілісного підходу, який охоплює весь ланцюг створення вартості: від збору та сортування відходів до остаточного очищення та використання відновлених РЗЕ. Проте, навіть за наявності таких викликів, відновлення РЗЕ з відходів флуоресцентного порошку відкриває значні можливості для стійкого управління ресурсами та розвитку економіки замкнутого циклу. Зниження залежності від первинного видобутку та

зменшення впливу утилізації на довкілля сприяють створенню більш стійкого ланцюга постачання РЗЕ.

Для реалізації цього потенціалу потрібні подальші дослідження та співпраця між науковими установами, промисловістю та урядовими структурами. Це включає розробку інноваційних методів вилучення, удосконалення існуючих технологій та впровадження відповідної політики й нормативних актів, які підтримуватимуть стале відновлення та використання РЗЕ.

Попри досягнення в технологіях відновлення РЗЕ, нагальною залишається потреба в розробці та вдосконаленні систем і правил їхнього відновлення. Поточна інфраструктура та нормативна база переробки електронних відходів не відповідають зростаючим обсягам і складності цих відходів. Відсутність стандартизованих процедур збору, сортування та обробки спричиняє низьку ефективність та обмежує можливості масштабного відновлення РЗЕ.

Для вирішення цих проблем необхідна співпраця між урядами та галузями для створення всеосяжних стратегій управління електронними відходами з акцентом на відновлення РЗЕ. Схеми розширеної відповідальності виробника (EPR), які зобов'язують виробників утилізувати свою продукцію після завершення терміну її використання, можуть стати ефективним інструментом. Крім того, стимули для споживачів щодо правильної утилізації електронних відходів та проведення кампаній з підвищення обізнаності громадськості допоможуть збільшити рівень збору й зменшити кількість РЗЕ, що втрачаються на сміттєзвалищах.

Створення та вдосконалення систем переробки РЗЕ також потребує стандартизації процедур збору, сортування та обробки, запровадження стандартів викидів і управління відходами, а також підтримки впровадження найкращих доступних технологій. Цей багатогранний підхід є необхідним для забезпечення сталого управління електронними відходами та ефективного використання ресурсів.

Рисунок 3.1 ілюструє ключові кроки у створенні та вдосконаленні систем і правил переробки РЗЕ. Як показано на малюнку 8, створення комплексної системи переробки РЗЕ та нормативних актів вимагає багатогранних зусиль, включаючи впровадження схем EPR, стандартизацію процедур збору, сортування та обробки, надання стимулів для споживачів, проведення кампаній з підвищення обізнаності громадськості, встановлення стандартів викидів та управління відходами, та сприяння прийняттю найкращих доступних технологій (BAT).



Рис. 3.1 Ключові кроки у створенні та вдосконаленні систем і правил переробки РЗЕ.

Встановлення чітких стандартів і регулювання процесів відновлення рідкоземельних елементів (РЗЕ) є ключовим етапом для забезпечення екологічно безпечної діяльності та захисту здоров'я населення. Це включає встановлення нормативів щодо викидів, методів поводження з відходами та правил безпеки праці для працівників, задіяних у галузі переробки. Крім того, заохочення розробки та впровадження найкращих доступних технологій (НДТ) дозволить мінімізувати екологічний вплив процесів відновлення, забезпечуючи при цьому максимально ефективне використання ресурсів. Послідовна реалізація цих заходів сприятиме підвищенню ефективності відновлення РЗЕ, зменшенню негативного впливу на довкілля та стимулюванню сталого використання РЗЕ, отриманих із електронних відходів.

На основі цих зусиль, спрямованих на вдосконалення систем регулювання та процесів відновлення, подальша увага приділяється

оптимізації та інтеграції технологій, що використовуються для відновлення РЗЕ. У наступному розділі докладно розглядається цей аспект, з акцентом на забезпечення сталого розвитку галузі переробки рідкоземельних елементів.

Попри те, що раніше було обговорено окремі технології відновлення РЗЕ та їхні вдосконалення, існує значний потенціал для подальшого об'єднання цих методів у комплексні та синергічні системи. Кожна технологія має свої переваги та обмеження, і комбінування їх у рамках інноваційних підходів може забезпечити підвищення ефективності, зниження витрат та екологічно безпечний характер процесів. На основі такого підходу можливо досягти значних результатів у сфері сталого використання РЗЕ.

Як показано на рисунку 3.2, кілька синергетичних комбінацій можуть підвищити загальну ефективність процесів відновлення РЗЕ. Наприклад, інтеграція біовилуговування з гідрометалургією може зменшити використання хімікатів, споживання енергії та вплив на навколишнє середовище, зберігаючи високі показники відновлення [127]. Подібним чином поєднання надкритичної рідинної екстракції з іонною рідинною екстракцією може підвищити селективність і чистоту відновлених РЗЕ [145]. Інші перспективні комбінації включають екстракцію розчинником + екстракцію іонною рідиною, біовилуговування + екстракцію розчинником і гідрометалургію + надкритичну рідину. Оптимізація цих інтегрованих технологій відновлення повинна враховувати такі фактори, як ефективність, економічна ефективність і вплив на навколишнє середовище. Розгляд життєвого циклу, включаючи еко-дизайн для розбирання, замкнутого циклу переробки та циркулярності ресурсів, також є вирішальними в розробці стійких процесів відновлення РЗЕ [146, 147].

Крім того, процес інтеграції має включати постійне вдосконалення та систему зворотного зв'язку для вдосконалення та адаптації об'єднаних технологій на основі їх продуктивності та змінних вимог ринку. Цей ітераційний підхід гарантує, що інтегровані процеси відновлення залишаються оптимізованими та реагують на зміни умов.



Рис. 3.2 Принципова схема оптимізації та інтеграції технології відновлення РЗЕ.

Дослідники та індустрії повинні вивчити ці синергетичні підходи для розробки гібридних процесів відновлення, які використовують переваги різних технологій.

Роблячи це, вони можуть сприяти розробці більш стійких і ефективних методів відновлення РЗЕ, зрештою підтримуючи зростаючий попит на ці критично важливі матеріали в різних сферах застосування.

3.4. Синергетичний розвиток ресурсокористування та екологічності

Синергетичний розвиток ресурсокористування та екологічної безпеки є основою для досягнення сталого розвитку в галузі переробки рідкоземельних елементів (РЗЕ). Це вимагає ретельного балансу між ефективним використанням ресурсів і захистом навколишнього середовища. Незважаючи на значні економічні можливості, які відкриває відновлення РЗЕ з електронних

відходів, цей процес не повинен загрожувати екологічній цілісності або здоров'ю людей.

На основі досліджень, джерела та розподіл РЗЕ в електронних відходах, а також потенційні екологічні наслідки їх переробки детально проаналізовані. Зокрема, процеси переробки можуть спричиняти різні екологічні проблеми, серед яких забруднення ґрунту та водних ресурсів, негативний вплив на ріст рослин, а також токсичність, що впливає на репродуктивну здатність організмів. Ці екологічні виклики наголошують на необхідності розробки та впровадження стійких технологій і методів у промислових процесах переробки РЗЕ.

Для успішного вирішення цих проблем необхідний комплексний підхід, який поєднує економічну доцільність з екологічною відповідальністю. Це дозволить не тільки зменшити негативний вплив на довкілля, але й забезпечити довгострокову ефективність і сталість галузі переробки рідкоземельних елементів

Рисунок 3.4 ілюструє джерела та розподіл рідкоземельних елементів в електронних відходах, а також потенційний вплив процесу переробки на навколишнє середовище [150]. Як показано на малюнку, переробка РЗЕ з електронних відходів може призвести до різноманітних екологічних проблем, таких як забруднення ґрунту та води, пригнічення росту та репродуктивна токсичність. Ці впливи на навколишнє середовище підкреслюють важливість впровадження стійких методів і технологій у промисловості переробки рідкоземельних елементів.

Ретельний вибір і оптимізація методів відновлення рідкоземельних елементів дозволяють знизити вплив переробки на довкілля та водночас максимізувати ефективність використання ресурсів. У цьому контексті особливу роль відіграє впровадження принципів циркулярної економіки, які спрямовані на максимально раціональне використання ресурсів і мінімізацію утворення відходів.

надання фінансових стимулів і створення сприятливого нормативного середовища. Спільні зусилля бізнесу, урядів та громадськості є необхідними для популяризації ідей циркулярної економіки та забезпечення пріоритетності охорони довкілля.

Поєднання ефективного використання ресурсів та екологічної стійкості дозволяє галузі переробки рідкоземельних елементів зробити значний внесок у створення більш стійкої замкнутої економіки.

Висновки до розділу 3:

У цьому дослідженні було проведено комплексний аналіз підходів до відновлення рідкоземельних елементів (РЗЕ) з відходів флуоресцентних порошків, зосереджуючи увагу на підвищенні ефективності вилучення, селективності процесів і екологічній стійкості технологій. Здійснено оцінку сучасних методів, таких як оптимізація параметрів вилуговування та використання іонної рідинної екстракції, що дозволило досягти високих показників вилучення РЗЕ. Продемонстровано перспективи застосування інноваційних технологій, таких як біогідрометалургія, яка забезпечує екологічно безпечне вилучення елементів за допомогою мікроорганізмів.

Досліджено ефективність новітніх технологій, включаючи використання біфункціональних іонних рідких екстрагентів, а також впровадження методів машинного навчання для оптимізації процесу вилуговування. Результати засвідчили можливість досягнення високих рівнів відновлення РЗЕ при мінімальному впливі на довкілля. Також розглянуто можливості масштабування біогідрометалургійних процесів, що демонструють значний потенціал для промислового впровадження.

Аналіз викликів, таких як неоднорідність складу відходів і потреба в інтеграції технологій, дозволив визначити напрями подальшого вдосконалення процесів відновлення РЗЕ. Впровадження концепції циркулярної економіки та інтеграція інноваційних підходів сприятимуть підвищенню ефективності та екологічності методів переробки.

Досягнуто розуміння ключових факторів, що впливають на успішність відновлення РЗЕ, і сформульовано рекомендації для подальшого розвитку галузі, зокрема, щодо створення нормативної бази, стимулювання інновацій та розширення співпраці між науковими установами, промисловістю й урядовими органами. Таким чином, результати цього дослідження роблять внесок у розвиток екологічно сталих і технологічно ефективних підходів до переробки рідкоземельних елементів із вторинних ресурсів.

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ВІДХОДІВ В ЯКОСТІ СИРОВИНИ ДЛЯ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ

На початку ХХІ століття проблема утилізації електронного та електричного обладнання набула глобального масштабу. Завдяки стрімкому розвитку технологій, постійній появі нових «розумних» пристроїв та скороченню терміну служби техніки кількість електронних відходів невпинно зростає. Це викликає значні екологічні проблеми, адже неналежне поводження з такими відходами призводить до забруднення ґрунту, водних ресурсів і атмосфери [1]. Бізнес і органи управління відходами опинилися перед серйозним викликом, оскільки прогнозується, що кількість електронних пристроїв у світі буде лише зростати, а мікропроцесори знаходять застосування у дедалі більшій кількості продуктів.

Електронні відходи охоплюють будь-які електричні та електронні пристрої, термін служби яких закінчився. Визначення електронних відходів включає як великі побутові пристрої (холодильники, кондиціонери), так і дрібну побутову техніку (мобільні телефони, портативні стереосистеми) та комп'ютерну техніку (ноутбуки, монітори, периферійні пристрої). За словами Сінха-Хетрівала, електронні відходи – це будь-який електронний пристрій, який більше не використовується через завершення терміну служби [2].

Щорічно у світі утворюється від 20 до 50 млн тонн електронних відходів, і ця цифра продовжує зростати. Для порівняння, звичайні побутові відходи зазвичай не містять токсичних речовин, тоді як електронні відходи можуть містити свинець (Pb), ртуть (Hg), кадмій (Cd), нікель (Ni), берилій (Be), хром (Cr) тощо. Ці матеріали становлять загрозу як для довкілля, так і для здоров'я людей. Зокрема, у телевізорах та моніторах широко використовуються

небезпечні речовини, такі як свинець і ртуть, а друковані плати містять кадмій, нікель та цинк.

Основною причиною зростання обсягів електронних відходів є короткий життєвий цикл сучасних пристроїв. Наприклад, комп'ютери та мобільні телефони зазвичай використовуються менше двох років, що сприяє швидкому накопиченню відходів. Неправильне поводження з електронними відходами, наприклад, їхнє спалювання або зберігання на звалищах, створює значні ризики для екології та здоров'я людей. Токсичні речовини, такі як ртуть, можуть проникати у ґрунтові води або накопичуватися в атмосфері у формі метилртуті (CH_3Hg), яка є надзвичайно небезпечною для живих організмів.

4.1 Важливість належної утилізації при використанні фіторемедіації

Забруднення ґрунтів і водного середовища становить серйозну екологічну проблему, що загрожує здоров'ю людей і функціонуванню біогеоценозів. Ефективним вирішенням цього питання може бути використання рослин-фіторемедіантів, здатних поглинати забруднюючі речовини з навколишнього середовища та хімічно їх трансформувати у своїх тканинах. Цей підхід спрямований на зменшення впливу важких металів та органічних забруднень на довкілля, забезпечуючи універсальність застосування до всіх типів забруднювачів, незалежно від їх агрегатного стану.

Фіторемедіація — це екологічно чистий метод очищення підстав, води та повітря від токсичних забруднювачів за допомогою рослин. Ця технологія базується на здатності певних видів рослин поглинати, трансформувати або зберігати забруднювачі у своїх тканинах чи кореневій зоні. Фіторемедіація використовується для відновлення пошкоджених екосистем, наприклад, від важких металів, нафтопродуктів, пестицидів тощо.

Фіторемедіація включає кілька методів, зокрема фітоекстракцію, фітодеградацію, фітофільтрацію, фітостабілізацію та фітовипаровування.

Фітоекстракція передбачає накопичення забруднювачів у тканинах рослин і є найпоширенішим методом завдяки своїй ефективності. Рослини, що використовуються для цього методу, повинні мати високу швидкість росту, розгалужену кореневу систему та здатність переносити токсичний вплив важких металів. Індукована фітоекстракція, яка базується на застосуванні хелатів, дозволяє значно підвищити здатність рослин поглинати метали, такі як свинець, кадмій, цинк та інші. Завдяки додаванню хелатів, таких як ЕДТА, рослини на кшталт індійської гірчиці або соняшника можуть накопичувати значну кількість забруднюючих речовин, ефективно очищуючи ґрунти.

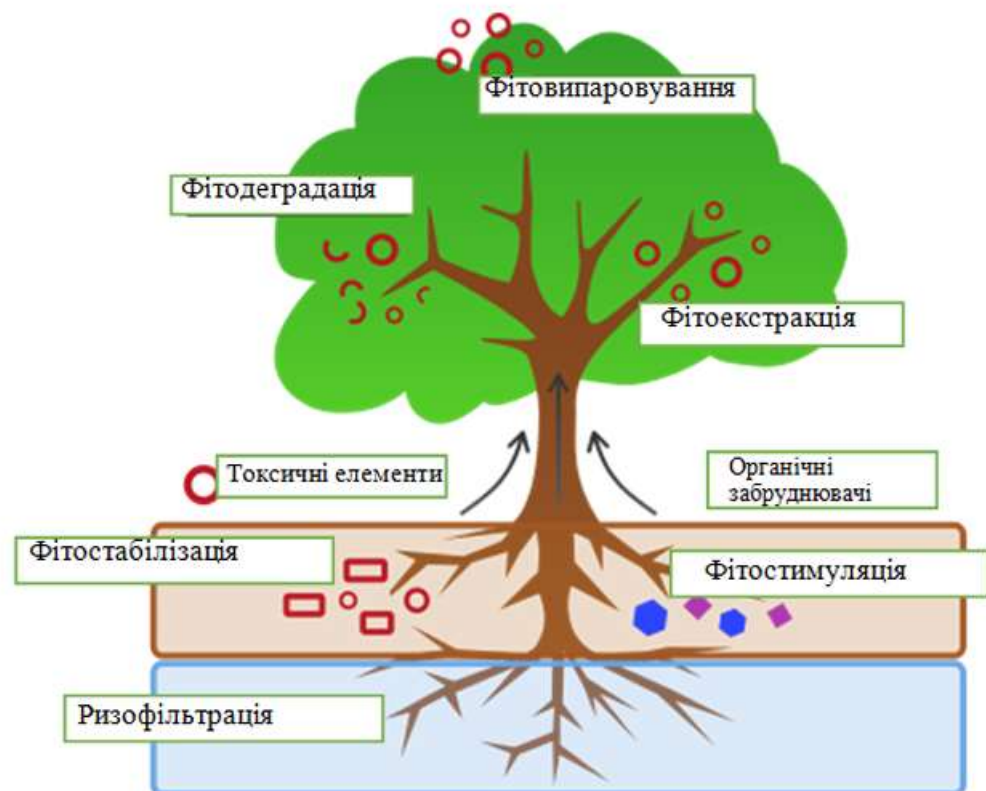


Рис.4.1 Схема методів фітореMediaції забруднених територій

Фітостабілізація орієнтована на закріплення важких металів у кореневій зоні, що обмежує їх міграцію та зменшує біодоступність для інших організмів. Цей метод особливо ефективний на ділянках, де необхідно запобігти потраплянню забруднювачів у харчові ланцюги чи ґрунтові води. Щільна рослинна покривна система допомагає зменшити розсіювання токсичних елементів вітром і водою, стабілізуючи екосистему[141,144,146].

Фітофільтрація передбачає видалення токсичних речовин з водного середовища за допомогою кореневої системи рослин. Рослини, вирощені в гідропонних умовах, адаптуються до очищення забруднених водойм, де токсичні елементи адсорбуються коренями або поглинаються ними. Цей метод є універсальним для очищення як наземних, так і водних екосистем, особливо із застосуванням водних видів рослин, таких як ряска або рогоз.

Фітовипаровування базується на здатності рослин переносити забруднювачі до пагонів, де вони випаровуються в атмосферу. Цей метод ефективний для видалення летких металів, таких як ртуть і селен, з екосистем. Дослідження показали, що деякі рослини можуть випаровувати важкі метали у вигляді летких сполук, таких як диметилселенід, що забезпечує природне зниження концентрації токсичних елементів у ґрунті та воді.

Ефективність фіторемедіації значною мірою залежить від біодоступності забруднювачів. Цей показник визначається фізичними та хімічними властивостями ґрунту, такими як рН, склад органічних речовин і окислювально-відновні властивості. Додавання органічних чи мінеральних добавок до ґрунту може змінити ці параметри, що сприяє збільшенню доступності важких металів для рослин.

Особливе значення у фіторемедіації мають місцеві види рослин, адаптовані до екологічних умов конкретної території. Вони демонструють кращу стійкість до токсичних речовин і можуть ефективно накопичувати забруднювачі у своїх тканинах. Дослідження показують, що природна рослинність забруднених ділянок часто виявляє підвищену здатність до гіперакумуляції важких металів і металоїдів. Наприклад, види, такі як *Coronilla juncea* чи *Globularia alurum*, добре зарекомендували себе для стабілізації та видалення забруднюючих речовин із ґрунту.

Трансгенні рослини відкривають нові перспективи у фіторемедіації. Генетично модифіковані рослини здатні ефективно поглинати й метаболізувати важкі метали, знижуючи їх токсичність для екосистем. Такі рослини можуть бути адаптовані до різних типів забруднювачів і умов

середовища, що робить їх цінним інструментом для очищення деградованих територій.

У результаті фіторе mediaція є перспективним методом рекультивації забруднених земель завдяки своїй економічності та екологічності. Її застосування дозволяє не лише знижувати рівень токсичних речовин у навколишньому середовищі, але й створювати стійкі екосистеми, що сприяють відновленню природного балансу.

Важливим аспектом застосування фіторе mediaції є інтеграція її з іншими екологічними та технічними підходами, що дозволяє підвищити ефективність рекультивації. Наприклад, використання біовугілля або компосту як добавок до ґрунту не лише сприяє зниженню біодоступності важких металів, але й покращує структуру ґрунту та підвищує його родючість. Такі комбіновані методи дозволяють створювати більш стійкі та продуктивні екосистеми на забруднених територіях.

Роль мікроорганізмів, які взаємодіють із рослинами, також є невід'ємною частиною процесу фіторе mediaції. Ризосферні бактерії та мікоризні гриби можуть не лише сприяти поглинанню забруднюючих речовин, але й забезпечувати рослини необхідними поживними речовинами. Завдяки утворенню хелатів, осадженню металів і стимулюванню росту рослин ці мікроорганізми значно підвищують ефективність очищення ґрунтів і вод.

Крім природних методів, все більшу увагу привертають трансгенні технології. Генетична модифікація рослин дозволяє створювати сорти з підвищеною здатністю до гіперакумуляції забруднювачів або стійкістю до їх токсичного впливу. Наприклад, впровадження генів, що кодують синтез металотіонеїнів або фітохелатинів, дозволяє рослинам ефективніше зв'язувати іони важких металів і знижувати їх токсичність у тканинах.

Іншим напрямом є створення рослин із поліпшеною здатністю до транспірації, що є важливим для процесу фітовипаровування. Завдяки активному транспіраційному потоку рослини здатні переносити леткі метали з ґрунту до атмосфери, знижуючи їх концентрацію в ґрунті. Проте

використання цього методу вимагає ретельної оцінки екологічних ризиків, пов'язаних із потраплянням металів у повітря.

Особливу увагу приділяють дослідженню природних гіперакумуляторів, таких як представники родин Brassicaceae та Fabaceae. Ці рослини здатні накопичувати значні концентрації важких металів у своїх тканинах без шкоди для власного росту і розвитку. Наприклад, види *Thlaspi caerulescens* і *Alyssum murale* можуть накопичувати нікель, цинк та інші метали, що робить їх перспективними для рекультивації деградованих земель.

Таблиця 4.1.

Приклади рослин фіторемедіантів-гіперакумуляторів

Рослина	Забруднювач	Метод фіторемедіації	Додаткові переваги
Індійська гірчиця (<i>Brassica juncea</i>)	Свинець, кадмій, цинк	Фітоекстракція	Висока біомаса, швидкий ріст
Соняшник (<i>Helianthus annuus</i>)	Свинець, радіонукліди	Фітоекстракція, фітофільтрація	Адаптований до різних умов, підходить для біопалива
Гіацинт (<i>Eichhornia crassipes</i>)	Кадмій, мідь	Фітофільтрація	Висока здатність до очищення вод
Альтернантера (<i>Alternanthera philoxeroides</i>)	Арсен, нікель	Фітовипаровування	Ефективна у водних і болотистих місцевостях
Тополі (<i>Populus spp.</i>)	Органічні забруднювачі, важкі метали	Фітодеградація, фітоекстракція	Швидкий ріст, висока толерантність до забруднювачів

Однак основною проблемою використання природних гіперакумуляторів є їхня низька продуктивність біомаси, що обмежує масштабність їх застосування. Тому вчені активно досліджують можливості генетичного поліпшення цих рослин або пошуку нових видів, здатних до гіперакумуляції.

Дослідження показують, що місцеві види рослин мають значні переваги у порівнянні з інтродукованими через їх кращу адаптацію до екологічних умов конкретних територій. Завдяки цьому вони можуть забезпечувати більш стабільний ефект фітореMediaції, зберігаючи біорізноманіття та сприяючи відновленню екосистем.

Застосування місцевих видів рослин, таких як *Pennisetum purpureum*, *Argemone mexicana*, або *Calotropis procera*, показало високу ефективність у видаленні важких металів з забруднених територій. Ці рослини демонструють здатність до накопичення таких елементів, як свинець, цинк, кадмій та мідь, що дозволяє використовувати їх у широкомасштабних проектах з відновлення земель.

Водночас важливо враховувати, що фітореMediaція є тривалим процесом, який може займати від кількох років до десятиліть залежно від ступеня забруднення. Для прискорення процесу необхідно інтегрувати цей метод із іншими технологіями, такими як внесення меліорантів, біотехнології або фізико-хімічні методи очищення.

Таким чином, фітореMediaція є універсальним і перспективним інструментом для рекультивації забруднених територій. Її застосування дозволяє не лише знижувати рівень токсичних речовин у довкіллі, але й сприяти відновленню природного середовища, підвищенню біорізноманіття та покращенню екологічного стану деградованих земель.

Розвиток технологій фітореMediaції значною мірою спирається на розуміння механізмів, за допомогою яких рослини адаптуються до токсичних умов і забезпечують очищення середовища. Одним із ключових аспектів є здатність рослин не лише накопичувати важкі метали, а й ефективно їх детоксифікувати. Наприклад, утворення хелатів з важкими металами, таких як кадмій або мідь, знижує їх токсичність для рослинних тканин і забезпечує безпечне накопичення у біомасі.

Металотіонеїни та фітохелатини, що утворюються в рослинах, відіграють важливу роль у зв'язуванні металів і формуванні стабільних

комплексів, які легко транспортуються і зберігаються. Металотіонеїни, багаті на цистеїн, виявляють високу спорідненість до міді та інших металів, тоді як фітохелатини синтезуються ферментативно і ефективно зв'язують кадмій. Ці механізми є природними адаптаціями рослин, які можна використовувати для розробки нових методів фіторе mediaції.

Дослідження також показують, що значну роль у зниженні токсичності металів відіграють механізми їх осадження у вигляді малорозчинних сполук. Наприклад, свинець або цинк можуть утворювати карбонати, сульфати чи фосфати в тканинах рослин або ризосфері, що зменшує їх доступність для інших організмів. Подібним чином, відновлення окислених форм металів, таких як Cr (VI), до менш токсичних форм Cr (III) сприяє стабілізації забруднювачів у ґрунтах.

Окрім важких металів, фіторе mediaція може бути ефективною для видалення органічних забруднювачів і металоїдів. Наприклад, селен, токсичний у високих концентраціях, може метаболізуватися рослинами до менш токсичних форм, таких як метилселеноцистеїн. Ця сполука потім включається до білків або випаровується у вигляді леткого диметилселеніду, забезпечуючи детоксикацію селену в ґрунтах.

Інший приклад — миш'як, який накопичується переважно в коренях рослин. Морські водорості та деякі наземні види здатні трансформувати його у летючі диметиларсеніти, що зменшує його токсичність. Хоча цей процес залишається недостатньо вивченим, використання рослин для біотрансформації миш'яку відкриває нові перспективи у боротьбі з цим токсичним елементом.

Важливим компонентом ефективної фіторе mediaції є здатність рослин стимулювати процеси в ризосфері. Виділення органічних кислот, таких як мугенова чи авенова, сприяє мобілізації заліза, цинку або міді в ґрунті, збільшуючи їх біодоступність для поглинання корінням. Водночас коренева хелатредуктаза здатна знижувати окислені форми металів до розчинних, підвищуючи ефективність їх транспортування.

Одним із перспективних напрямків є використання мікроорганізмів ризосфери, які можуть взаємодіяти з корінням рослин, посилюючи їхню здатність до фітореMediaції. Бактерії, що утворюють хелати, або мікоризні гриби, які покращують поглинання поживних речовин, сприяють утворенню більш стабільних комплексів металів і покращують їх мобілізацію в ґрунтовому розчині.

Екологічні переваги фітореMediaції включають не лише очищення забруднених територій, але й створення більш стійких екосистем. Рослини, що використовуються для фітореMediaції, сприяють збагаченню ґрунтів органічними речовинами, запобігають ерозії та знижують ризик розсіювання токсичних речовин у довкіллі.

У майбутньому використання фітореMediaції може бути ще більш ефективним завдяки інтеграції нових технологій, таких як генно-інженерні підходи та біотехнології. Створення трансгенних рослин із посиленими здатностями до детоксикації металів чи стійкістю до забруднювачів дозволить значно розширити можливості цієї технології.

Таким чином, фітореMediaція продовжує залишатися одним із найбільш перспективних і екологічно безпечних способів відновлення забруднених територій. Її розвиток сприяє покращенню екологічної ситуації, збереженню природних ресурсів і створенню умов для сталого розвитку людства.

Потенціал фітореMediaції значно розширюється завдяки інтеграції цього методу з іншими екологічними підходами та сучасними технологіями. Наприклад, внесення біовугілля або компосту до ґрунтів, окрім поліпшення їхньої структури, знижує біодоступність важких металів. Це забезпечує більш стабільне функціонування екосистем і створює умови для ефективної роботи рослин-фітореMediaнтів.

Серед напрямів досліджень, які активно розвиваються, можна виокремити використання нанотехнологій у фітореMediaції. Включення наноматеріалів, таких як наночастинки металів або оксидів, у ґрунти дозволяє змінювати їхні хімічні властивості, підвищуючи біодоступність важких

металів або органічних забруднювачів. Нанотехнології також можуть сприяти доставці поживних речовин чи стимуляторів росту до коренів рослин, що забезпечує більш швидке очищення забруднених територій.

Особливу увагу слід приділити розробці моделей прогнозування ефективності фітореMediaції. Створення моделі прогнозування ефективності фітореMediaції можна реалізувати за допомогою методів машинного навчання або математичних моделей. Використання програмного забезпечення, що базується на аналізі властивостей ґрунту, кліматичних умов і характеристик забруднювачів, дозволяє оптимізувати вибір рослин для конкретних ділянок. Такі підходи роблять процес рекультивації більш ефективним і передбачуваним.

Економічна доцільність фітореMediaції є одним із ключових факторів, що визначають її широке застосування. Порівняно з фізико-хімічними методами очищення, такими як екскавація чи промивання ґрунтів, фітореMediaція є набагато дешевшою. Вона не потребує значних енергетичних витрат або складного технічного обладнання, що робить її привабливим варіантом для використання навіть у країнах із обмеженими фінансовими ресурсами.

Водночас важливо враховувати, що фітореMediaція має певні обмеження. Наприклад, для очищення сильно забруднених територій чи ділянок з низьким вмістом поживних речовин необхідне додаткове втручання, як-от внесення меліорантів чи застосування попереднього очищення. Також швидкість очищення за допомогою рослин є відносно низькою, тому цей метод краще підходить для довгострокових проєктів[145].

Розширення генетичних досліджень дозволяє створювати рослини з унікальними властивостями, які можна застосовувати у фітореMediaції. Наприклад, генетично модифіковані рослини, що мають підвищену стійкість до важких металів чи здатність до швидшого їх поглинання, відкривають нові можливості для очищення забруднених територій. Інженерія гіперакумуляторів, таких як *Thlaspi caerulescens*, спрямована на збільшення

їхньої продуктивності та здатності до транспортування металів з коренів у пагони.

Фіторемедіація має також значний потенціал у боротьбі зі змінами клімату. Використання рослин для очищення ґрунтів і вод сприяє накопиченню органічного вуглецю в ґрунтах, знижуючи рівень вуглекислого газу в атмосфері. Крім того, багато видів рослин-фіторемедіантів можуть бути використані для біоенергетики, оскільки накопичена біомаса може слугувати сировиною для виробництва біопалива. Це дозволяє інтегрувати очищення забруднених територій у більш широкі програми сталого розвитку.

Суспільне сприйняття фіторемедіації також відіграє важливу роль у її застосуванні. Підвищення обізнаності про екологічні переваги цього методу серед населення і залучення громад до процесу очищення забруднених територій може сприяти його поширенню. Освітні кампанії та участь місцевих спільнот у проєктах фіторемедіації допомагають не лише вирішувати екологічні проблеми, але й формувати відповідальне ставлення до довкілля.

Науковці та екологи продовжують працювати над удосконаленням технологій фіторемедіації, шукаючи нові рослини-фіторемедіанти, розробляючи більш ефективні способи утилізації накопиченої біомаси, а також інтегруючи цей метод з іншими технологіями відновлення територій. У підсумку, фіторемедіація залишається одним із ключових інструментів для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку у XXI столітті.

Фіторемедіація також дає змогу підвищувати екологічну та економічну стійкість регіонів, де її застосовують. Наприклад, біомаса, отримана під час фітоекстракції, може бути використана для отримання цінних матеріалів, таких як біовугілля або вторинні метали, що робить цей метод більш привабливим з економічної точки зору. Однак утилізація біомаси, насиченої токсичними речовинами, залишається одним із ключових викликів, який потребує подальшого дослідження[147].

Сучасні дослідження фокусуються на комбінованих методах, які включають фіторемедіацію та інші технології, як-от біоремедіацію, що

передбачає використання мікроорганізмів для розкладання органічних забруднювачів. Така інтеграція значно підвищує ефективність очищення складних забруднень. Наприклад, ризосферні бактерії можуть сприяти мобілізації важких металів у ґрунті, покращуючи їх доступність для рослин.

Успішна реалізація фіторе mediaційних проєктів потребує багатофакторного підходу. Важливо враховувати не лише характеристики забрудненої ділянки, але й екологічну стійкість обраних видів рослин, їхню толерантність до важких металів і здатність до накопичення біомаси. У цьому контексті важливим залишається розвиток адаптованих моделей управління такими проєктами з використанням сучасних інформаційних технологій.

Таблиця 4.2

Порівняння методів фіторе mediaції

Метод	Опис	Переваги	Недоліки
Фітоекстракція	Видалення металів через накопичення у біомасі рослин	Ефективна для важких металів, можливість утилізації металів	Тривалий процес, потребує утилізації насиченої біомаси
Фітостабілізація	Імобілізація забруднювачів у ризосфері	Зменшення міграції токсичних речовин, захист ґрунтових вод	Не видаляє забруднювачі з екосистеми
Фітофільтрація	Очищення води через поглинання корінням	Ефективна для водних середовищ, швидке очищення	Потребує регулярного оновлення рослин
Фітовипаровування	Випаровування токсичних речовин через транспірацію	Видалення летких металів (ртуть, селен), не потребує утилізації біомаси	Можливий вплив на атмосферу
Фітодеградація	Розклад органічних забруднювачів за участю рослин і мікроорганізмів	Ефективна для органічних речовин, поліпшення ґрунтової екосистеми	Потребує оптимізації умов для росту рослин і мікроорганізмів

Фіторе mediaція залишається багатофункціональним підходом для відновлення деградованих територій, що сприяє сталому розвитку та

підтримці екологічного балансу. Застосування сучасних наукових розробок дозволить значно розширити можливості цього методу.

Продовжуючи аналіз можливостей фітореMediaції, важливо підкреслити, що її ефективність залежить від багатьох факторів, включаючи властивості ґрунту, тип забруднювача, кліматичні умови та обрані види рослин. Дослідження показують, що оптимізація цих параметрів значно підвищує ефективність очищення територій. Наприклад, застосування органічних добавок (компосту або біовугілля) може покращити структуру ґрунту, збільшити біодоступність забруднювачів і створити сприятливі умови для росту рослин. Рисунок 4.2 демонструє ефективність різних методів фітореMediaції щодо видалення важких металів (у відсотках). Дані засновані на типовій ефективності кожного методу для видалення свинцю, кадмію та цинку.

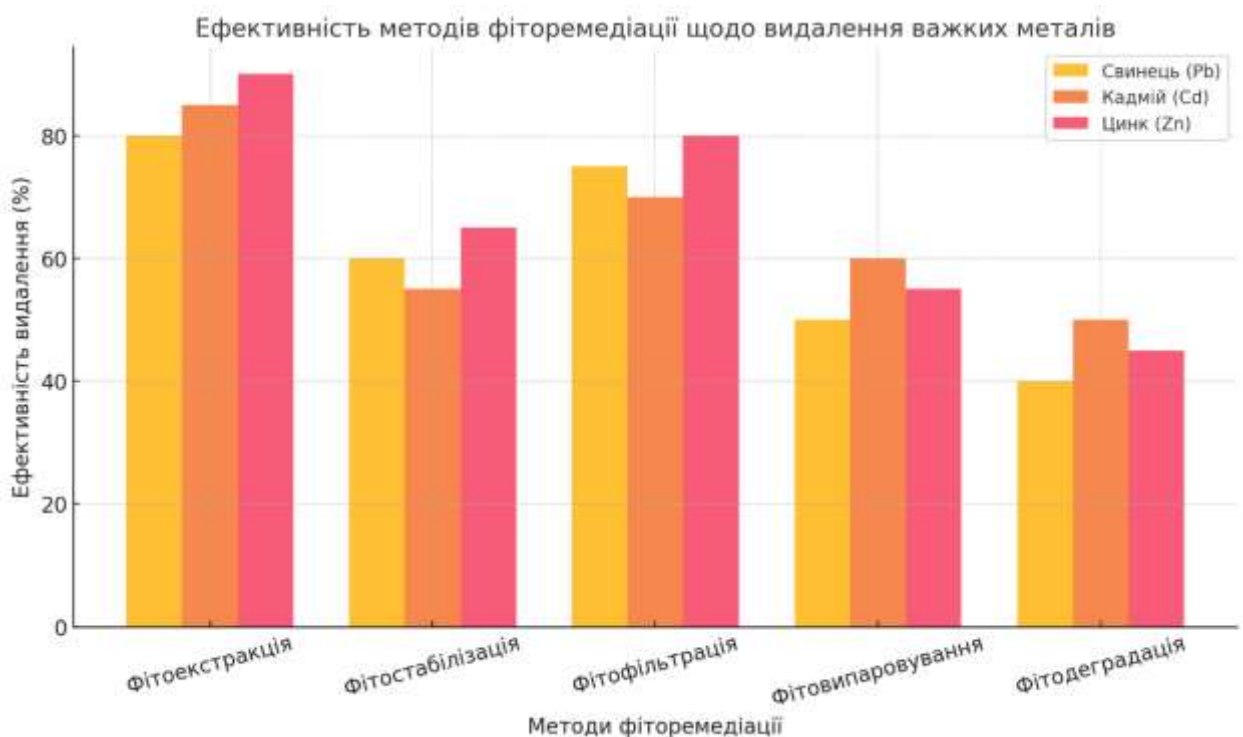


Рис. 4.2 Ефективність методів фітореMediaції щодо видалення важких металів

На графіку представлено ефективність різних методів фітореMediaції щодо видалення свинцю (Pb), кадмію (Cd) та цинку (Zn).

Як видно, фітоекстракція демонструє найвищу ефективність для всіх трьох металів, особливо для цинку (до 90%). Водночас фітостабілізація є менш ефективною для видалення металів, але вона добре підходить для обмеження їхньої міграції. Фітовипаровування та фітодеградація мають нижчі показники, однак вони є корисними для специфічних видів забруднювачів[149,150].

Ці дані підтверджують, що вибір методу залежить від типу забруднювача та конкретних умов середовища.

При цьому бралися до уваги саме рослини, які часто використовуються для фітоекстракції завдяки їхній здатності накопичувати важкі метали та інші забруднювачі:

Таблиця 4.3

Застосування рослин для накопичення забруднювачів

Рослина	Забруднювачі	Особливості	Приклад застосування
Індійська гірчиця (<i>Brassica juncea</i>)	Свинець (Pb), Кадмій (Cd), Цинк (Zn), Мідь (Cu), Селен (Se)	Висока швидкість росту, значна надземна біомаса, добре адаптується до різних умов	Очищення ґрунтів від свинцю за допомогою хелатів (ЕДТА)
Соняшник (<i>Helianthus annuus</i>)	Свинець (Pb), Радіонукліди (цезій-137, стронцій-90), Кадмій (Cd)	Глибока коренева система, здатність накопичувати метали у надземній біомасі	Очищення ґрунтів, забруднених радіонуклідами, після аварій на АЕС
Альпійська гірчиця (<i>Thlaspi caerulescens</i>)	Цинк (Zn), Нікель (Ni), Кадмій (Cd)	Природний гіперакумулятор, накопичує >1% сухої біомаси	Очищення від цинку та кадмію на промислових відвалах
Кукурудза (<i>Zea mays</i>)	Свинець (Pb), Кадмій (Cd), Цинк (Zn)	Висока продуктивність біомаси, ефективність підвищується з хелатами	Видалення свинцю з ґрунтів сільськогосподарських угідь
Очерет звичайний (<i>Phragmites australis</i>)	Свинець (Pb), Кадмій (Cd), Миш'як (As)	Адаптований до водно-болотних угідь, очищує мулові відкладення	Очищення стічних вод та забруднених водойм
Тополя (<i>Populus spp.</i>)	Свинець (Pb), Кадмій (Cd), Цинк (Zn), Органічні забруднювачі	Швидкий ріст, глибока коренева система, висока здатність до транспірації	Видалення важких металів і органічних речовин у міських умовах

Люцерна (<i>Medicago sativa</i>)	Миш'як (As), Кадмій (Cd), Нікель (Ni)	Стійка до стресів, покращує структуру ґрунту	Очищення ґрунтів і збагачення їх азотом
Лобода (<i>Chenopodium album</i>)	Свинець (Pb), Кадмій (Cd), Цинк (Zn)	Невибагливість, висока здатність до накопичення металів	Видалення важких металів на деградованих ґрунтах
Ейхорнія товстостеблова (<i>Eichhornia crassipes</i>)	Кадмій (Cd), Мідь (Cu), Ртуть (Hg)	Водна рослина, ефективно очищає водойми	Очищення стічних вод і водойм від важких металів
Ряска (<i>Lemna minor</i>)	Кадмій (Cd), Свинець (Pb), Миш'як (As)	Швидке зростання, ефективна у водних середовищах	Видалення забруднювачів із поверхневих вод

На даній по таблиці було також сформовано графік ефективності застосування рослин для видалення важких металів.

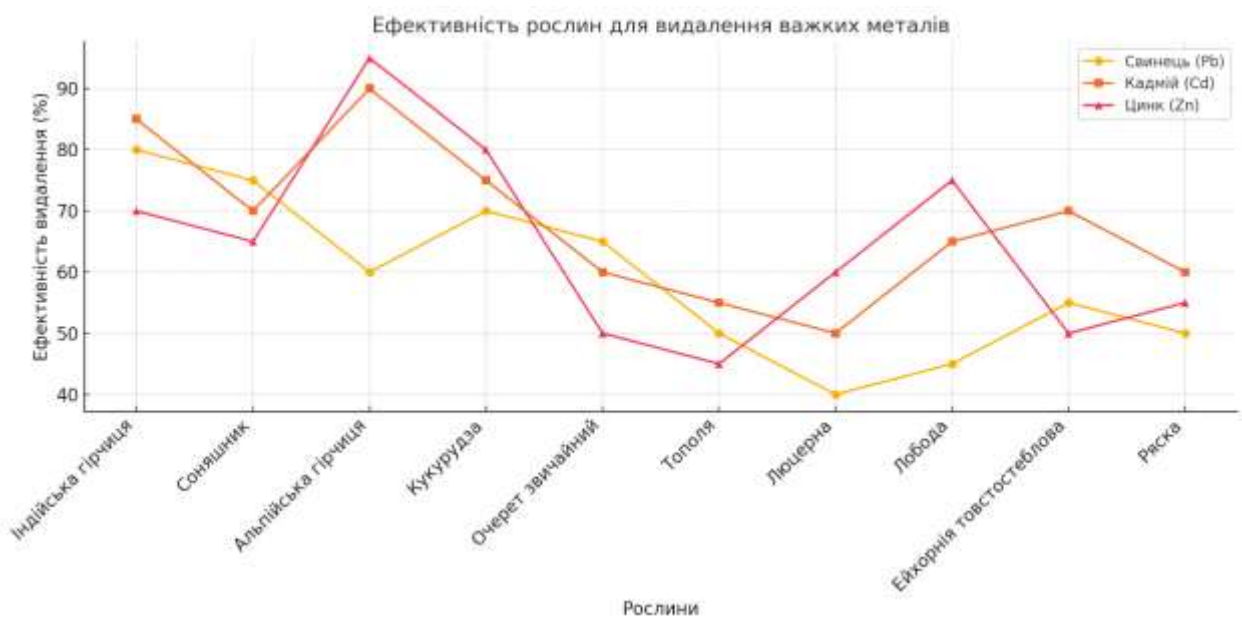


Рис.4.3 Ефективність рослин для видалення важких металів

На графіку представлено ефективність рослин для видалення важких металів (свинцю, кадмію та цинку):

- Індійська гірчиця і Соняшник демонструють високу ефективність у видаленні свинцю (80% і 75% відповідно), що робить їх універсальними рослинами для очищення..
- Альпійська гірчиця показує найкращі результати для кадмію (90%) і цинку (95%) що робить її одним із найкращих природних гіперакумуляторів.

- Ейхорнія товстостеблова та Ряска демонструють середні показники, проте особливо ефективні у водному середовищі.

Ці дані ілюструють можливості різних рослин для фітоекстракції в залежності від типу забруднювачів та середовища .

4.2 Аналіз регіональних позицій для впровадження фіторе mediaційних проектів в Україні

У регіонах із високим рівнем забруднення, таких як Донбас і Чорнобильська зона, важливим аспектом є контроль над поширенням забруднювачів у водні об'єкти та їх вторинною міграцією. Для цих територій можна також застосовувати додаткові заходи, наприклад, внесення органічних меліорантів, таких як біовугілля, для стабілізації важких металів у ґрунті. Поєднання фіторе mediaції з біоінженерними методами, такими як створення бар'єрів із швидкорослих дерев, сприятиме довгостроковій стабілізації екосистем.

Запорізька і Дніпропетровська області, де рівень забруднення є помірним, дають можливість експериментально впроваджувати більш інноваційні підходи, як-от використання трансгенних рослин для підвищення ефективності очищення. Тут важливо звернути увагу на території, прилеглі до промислових об'єктів, де концентрація забруднювачів може значно відрізнятися від середніх показників. У цих регіонах можливо також впроваджувати фітовипаровування для видалення летких сполук, таких як селен і ртуть, з водно-болотних угідь.

У Закарпатті та Волинській області, зважаючи на низький рівень забруднення, фіторе mediaція може виконувати профілактичну функцію. Використання місцевих рослин, адаптованих до природно-кліматичних умов, допоможе зберегти біорізноманіття і запобігти деградації земель. Наприклад, створення стійких рослинних покривів на потенційно небезпечних ділянках

мінімізує ерозію ґрунтів і потрапляння дрібнодисперсних частинок у воду та повітря.

Було також проаналізовано дані Державної екологічної інспекції України та державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), які дозволили сформувати графік рівню забруднень важкими металами в регіонах України.

Графік демонструє умовні рівні забруднення важкими металами (свинцем, кадмієм і цинком) у різних регіонах України:

- Найвищі рівні свинцю та цинку спостерігаються в Чорнобильській зоні та Донбасі, що вказує на значне техногенне навантаження.
- Кривий Ріг і Запорізька область також мають високі концентрації кадмію та цинку, зумовлені промисловими викидами.
- У Закарпатті та Волинській області рівні забруднення нижчі, що відповідає природно менш урбанізованим та індустріалізованим територіям.

У межах національної стратегії відновлення довкілля пріоритетним є створення системи моніторингу ефективності фіторемедіації. Залучення наукових установ і громадських організацій до аналізу результатів дозволить адаптувати методи до конкретних умов регіонів, а також розробляти нові підходи для роботи з комплексно забрудненими територіями.

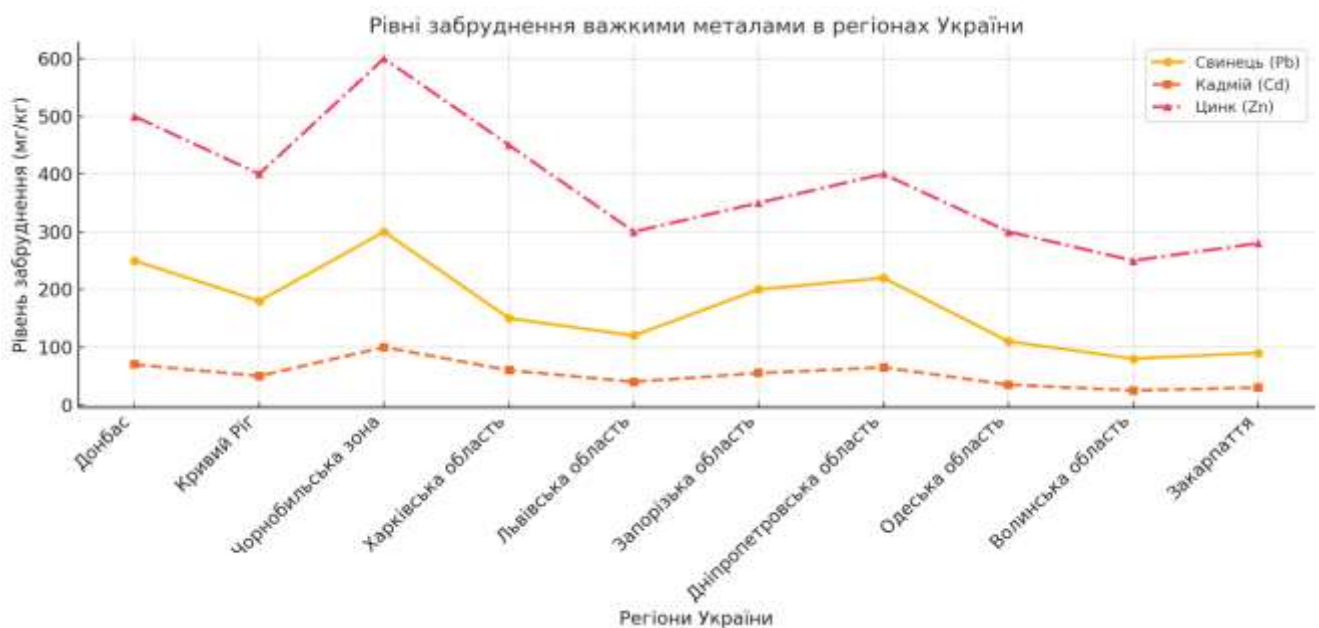


Рис.4.4 Рівні забруднення важкими металами в регіонах України

Крім того, освітні кампанії для місцевого населення можуть підвищити обізнаність про екологічні переваги фітореMediaції та сприяти більш активному залученню громад до екологічних ініціатив. Результати фітореMediaції в Україні залежать від масштабів забруднення, типів забруднювачів, обраних технологій та специфіки регіонів. У країні є приклади успішного застосування фітореMediaційних методів, але їх впровадження поки що має обмежений масштаб через технічні, фінансові та організаційні виклики.

Висновки до розділу 4:

Аналіз регіональних позицій щодо впровадження рекомендаційних фітореMediaційних проєктів в Україні про значний потенціал у відновленні екосистем, забруднених техногенними пошкодженнями. Однак для ефективного впровадження цих рекомендацій необхідно забезпечити специфіку кожного регіону, особливості забудовників та рівень технічної та фінансової підтримки.

- Донбас і Чорнобильська зона залишаються ключовими територіями для реалізації фітореMediaційних проєктів. Донбас, зі значним антропогенним навантаженням через промислове виробництво, зберігає високий рівень забруднення важкими металами, такими як свинець, кадмій і цинк. Застосування фітореMediaції в цих регіонах має доповнюватися біоінженерними заходами, такими як створення бар'єрів із швидкокорслих дерев. такі бар'єри сприяють утриманню забруднювачів у кореневій зоні та запобігають їх вторинній міграції до водних об'єктів. Крім того, внесення органічних меліорантів, зокрема біовугілля, дозволяє стабілізувати важкі метали в ґрунтах, зменшуючи їх доступність для міграції та поглинання рослин.

- У Чорнобильській зоні пріоритетом є зниження радіоактивного забруднення та стабілізація підстав. Тут доцільно впроваджувати трансгенні рослини, здатні накопичувати радіонукліди в біомасі, що дозволяє

локалізувати їх розподіл у природному середовищі. У додаток до цього додається система моніторингу використання, яка дає змогу контролювати ефективність застосованих технологій та адаптувати їх залежно від змін рівня впливу.

- Запорізька та Дніпропетровська області характеризуються подібним рівнем техногенного впливу, проте через значну кількість промислових об'єктів концентрація забруднювачів може бути нерівномірною. У цих регіонах є перспективи застосування фітовіпарування, що забезпечує видалення летких сполук, таких як ртуть, із водно-болотних угідь. Це може бути ефективним рішенням для промислових зон, де рівень забруднення водних ресурсів є критичним. Дослідницькі проекти, спрямовані на впровадження інноваційних технологій, наприклад, використання наноматеріалів для покращення абсорбційних властивостей рослин, можуть стати проривом для цих територій.

- Закарпаття та Волинська область демонструють низькі рівні забруднення, що відкриває можливості для використання фіторемедіації як профілактичного заходу. Місцеві види рослин, які природно адаптовані до кліматичних умов, можуть бути використані для створення стійких рослинних покривів. Це дозволяє мінімізувати ерозійні процеси, а також запобігти посиленню дрібнодисперсних частинок, які можуть вивести такі небезпечні елементи. У цих регіонах фіторемедіація може сприяти підвищенню якості земель та водних ресурсів, а також збереженню біорізноманітності.

Результати фіторемедіації значною мірою залежать від умов регіону та обраних методів. Для тривалого успіху фіторемедіації необхідна національна програма моніторингу, яка включає аналіз ефективності технологій у різних регіонах та розробку нових підходів для боротьби зі складними пошкодженнями. Залучення наукових установ і розробка інноваційних технологій, таких як використання мікроорганізмів для покращення вилугування важких металів, дозволяє досягти сталих результатів у відновленні екосистеми України.

ВИСНОВКИ

У цьому дослідженні було розглянуто ключові аспекти екологічно безпечних методів видобування рідкоземельних елементів (РЗЕ), зокрема фітореMediaцію, біогідрометалургію та інноваційні технології переробки відходів. Проведений аналіз підтвердив, що Україна має значний потенціал для впровадження сталих методів видобутку РЗЕ, зважаючи на рівень забруднення, регіональні особливості та індустріальний профіль країни.

Основними досягненнями роботи є:

1. Визначення екологічних і технологічних можливостей для застосування фітореMediaції в різних регіонах України, включаючи Донбас, Чорнобильську зону, Запорізьку та Дніпропетровську області.
2. Оцінка ефективності сучасних методів відновлення РЗЕ, таких як іонна рідинна екстракція, біовилуговування та використання трансгенних рослин.
3. Представлення прикладів успішної оптимізації методів вилучення РЗЕ з використанням машинного навчання, що дозволяє покращити ефективність процесів і зменшити вплив на довкілля.
4. Розробка рекомендацій щодо впровадження системи моніторингу фітореMediaційних проєктів та підтримки на державному рівні.

Виконані завдання:

- Досліджено можливості фітореMediaції для очищення ґрунтів у регіонах із високим рівнем забруднення.
- Проаналізовано застосування біогідрометалургійних технологій для відновлення РЗЕ з відходів флуоресцентних порошків та інших джерел.
- Визначено ефективність інтегрованих підходів, таких як поєднання біовилуговування з гідрометалургією, для зменшення енергоємності та підвищення екологічної стійкості.

- Розглянуто перспективи використання принципів циркулярної економіки, спрямованих на мінімізацію утворення відходів і максимальне використання ресурсів.

Досягнуті результати:

1. Встановлено, що найбільш забруднені регіони України (Донбас, Чорнобильська зона) потребують комплексного підходу до очищення, зокрема використання бар'єрних систем із швидкорослих дерев та органічних меліорантів.

2. Виявлено, що застосування іонних рідких екстрагентів (Bif-ILE) дозволяє досягти рівня відновлення РЗЕ до 95,2% із відходів флуоресцентних порошків.

3. Показано, що біогідрометалургія забезпечує екологічно стійке вилучення РЗЕ, зменшуючи використання агресивних хімічних речовин та знижуючи енергозатрати.

4. Обґрунтовано необхідність впровадження національної програми моніторингу ефективності фіторемедіації та адаптації технологій до локальних умов.

Загалом, це дослідження підтверджує, що використання екологічно безпечних методів видобування РЗЕ є перспективним напрямом для України. Інтеграція фіторемедіації, біогідрометалургії та інноваційних технологій у поєднанні з принципами циркулярної економіки сприяє сталому розвитку галузі та створенню замкнутої економіки. Подальші дослідження мають бути зосереджені на розробці нових технологій, розширенні практичного застосування існуючих методів і зміцненні співпраці між науковими, промисловими та урядовими структурами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Akcil, A.; Swami, K.R.; Gardas, R.L.; Hazrati, E.; Dembele, S. Overview on Hydrometallurgical Recovery of Rare-Earth Metals from Red Mud. *Minerals* **2024**, *14*, 587. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
2. Al Sultan, M.S.; Benli, B. Recent Sustainable Trends for E-Waste Bioleaching. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* **2023**. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
3. Alguacil, F.J.; Robla, J.I. Recent Work on the Recovery of Rare Earths Using Ionic Liquids and Deep Eutectic Solvents. *Minerals* **2023**, *13*, 1288. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
4. Amato, A.; Becci, A.; Bollero, A.; Cerrillo-Gonzalez, M.D.M.; Cuesta-Lopez, S.; Ener, S.; Dirba, I.; Gutfleisch, O.; Innocenzi, V.; Montes, M.; et al. Life Cycle Assessment of Rare Earth Elements-Free Permanent Magnet Alternatives: Sintered Ferrite and Mn–Al–C. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2023**, *11*, 13374–13386. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
5. Ambaye, T.G.; Vaccari, M.; Castro, F.D.; Prasad, S.; Rtimi, S. Emerging Technologies for the Recovery of Rare Earth Elements (REEs) from the End-of-Life Electronic Wastes: A Review on Progress, Challenges, and Perspectives. *Env. Sci. Pollut. Res.* **2020**, *27*, 36052–36074. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Anggara, F.; Petrus, H.T.; Besari, D.A.A.; Manurung, H.; Saputra, F.Y.A. Tinjauan pustaka karakterisasi dan potensi pemanfaatan fly ash dan bottom ash (FABA): Review on characterization and utilization potential of fly ash and bottom ash (FABA). *Bul. Sumber Daya Geol.* **2021**, *16*, 53–70. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
7. Artiushenko, O.; Da Silva, R.F.; Zaitsev, V. Recent Advances in Functional Materials for Rare Earth Recovery: A Review. *Sustain. Mater. Technol.* **2023**, *37*, e00681. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

8. Asadollahzadeh, M.; Torkaman, R.; Torab-Mostaedi, M. Optimization of Green Technique Develop for Europium (III) Extraction by Using Phosphonium Ionic Liquid and Central Composite Design Approach. *Int. J. Eng. Trans. B Appl.* **2021**, *34*, 508–516. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. Asadollahzadeh, M.; Torkaman, R.; Torab-Mostaedi, M. Recovery of Yttrium Ions from Fluorescent Lamp Waste through Supported Ionic Liquid Membrane: Process Optimisation via Response Surface Methodology. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* **2022**, *102*, 3161–3174. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Asadollahzadeh, M.; Torkaman, R.; Torab-Mostaedi, M.; Ghaemi, A.; Hemmati, A. Green Imidazolium Ionic Liquid Selectively Facilitates Ce(III) Ion Transport through Supported Liquid Membrane. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* **2022**, *102*, 4814–4829. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
11. Baker, R. Recent Advances in Rare Earth Extraction: Where Do WEEE Stand. *Ir. Chem. News* **2016**, *2*, 12–36. [[Google Scholar](#)]
12. Banda, R.; Forte, F.; Onghena, B.; Binnemans, K. Yttrium and Europium Separation by Solvent Extraction with Undiluted Thiocyanate Ionic Liquids. *RSC Adv.* **2019**, *9*, 4876–4883. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Barbieri, M. Searching Patent Information on the Recovery of Rare Earth Metals from Electronic Waste. *Qeios* **2023**. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
14. Basha, M.A.-F.; Morsi, R.M.M.; Morsi, M.M.; Basha, A.F. The Magnetic, Electrical and Optical Properties of Rare Earth Er³⁺ Doped Lead Borate Glass. *J. Electron. Mater.* **2019**, *48*, 6686–6693. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
15. Bernadsha, S.B. Unravelling the Necessity of Conservation and Recycling of Rare Earth Elements from the Perspective of Global Need. *Can. Metall. Q.* **2022**, *61*, 366–376. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
16. Borra, C.R.; Blanpain, B.; Pontikes, Y.; Binnemans, K.; Van Gerven, T. Recovery of Rare Earths and Major Metals from Bauxite Residue (Red Mud) by Alkali Roasting, Smelting, and Leaching. *J. Sustain. Metall.* **2017**, *3*, 393–404. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

17. Borra, V.L.; Jana, P.; Sahoo, P.P.; Venkatesan, P.; Önal, M.A.R.; Borra, C.R. Selective Recovery of Rare Earth Elements by Smelting of Magnets. *J. Rare Earths* **2024**, *in press*. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
18. Castro, L.; Blázquez, M.L.; González, F.; Muñoz, J.A. Bioleaching of Phosphate Minerals Using *Aspergillus Niger*: Recovery of Copper and Rare Earth Elements. *Metals* **2020**, *10*, 978. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
19. Chakraborty, S.C. & Qamruzzaman, Md & Zaman, Md. Wahad & Alam, Masruck & Hossain, D. & Pramanik, Biplob & Nguyen, Luong & Nghiem, Long & Ahmed, Firoz & Zhou, John & Mondal, Md & Hossain, M.A. & Johir, Md Abu Hasan & Ahmed, M.B. & Sithi, J.A. & Zargar, Masoumeh & Moni, Mohammad Ali. (2022). Metals in e-waste: Occurrence, fate, impacts and remediation technologies. Process Safety and Environmental Protection. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.011>
20. Charlotte Maluleke, K.; Camagu Goso, X.; Ndlovu, S.; Matinde, L. Investigations into the Extraction of Rare Earth Elements from Zandkopsdrift Ore Using the Sulfation Roasting Process. *Miner. Eng.* **2023**, *191*, 107902. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
21. Checa Fernández, B.L. Study and Optimization of a Recycling Process for Sintered Nd-Fe-B Magnets at the End of Their Useful Life. Doctoral Thesis, Universidad de Navarra, Navarra, Spain, 2023. [[Google Scholar](#)]
22. Cherkezova-Zheleva, Z.; Burada, M.; Sobetskii (Slobozeanu), A.E.; Paneva, D.; Fironda, S.A.; Piticescu, R.-R. Green and Sustainable Rare Earth Element Recycling and Reuse from End-of-Life Permanent Magnets. *Metals* **2024**, *14*, 658. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
23. Chung, H.; Prasakti, L.; Stopic, S.R.; Feldhaus, D.; Cvetković, V.S.; Friedrich, B. Recovery of Rare Earth Elements from Spent NdFeB Magnets: Metal Extraction by Molten Salt Electrolysis (Third Part). *Metals* **2023**, *13*, 559. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
24. Chung, H.; Stopic, S.; Emil-Kaya, E.; Gürmen, S.; Friedrich, B. Recovery of Rare Earth Elements from Spent NdFeB-Magnets: Separation of Iron

through Reductive Smelting of the Oxidized Material (Second Part). *Metals* **2022**, *12*, 1615. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

25. Cornelius, M.-L.U.; Ameh, A.E.; Eze, C.P.; Fatoba, O.; Sartbaeva, A.; Petrik, L.F. The Behaviour of Rare Earth Elements from South African Coal Fly Ash during Enrichment Processes: Wet, Magnetic Separation and Zeolitisation. *Minerals* **2021**, *11*, 950. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

26. Dańczak, A.; Chojnacka, I.; Matuska, S.; Marcola, K.; Leśniewicz, A.; Wełna, M.; Żak, A.; Adamski, Z.; Rycerz, L. The Recycling-Oriented Material Characterization of Hard Disk Drives with Special Emphasis on NdFeB Magnets. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* **2018**, *54*, 363–376. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

27. Danso, I.K.; Cueva-Sola, A.B.; Masaud, Z.; Lee, J.-Y.; Jyothi, R.K. Ionic Liquids for the Recovery of Rare Earth Elements from Coal Combustion Products. In *Clean Coal Technologies*; Jyothi, R.K., Parhi, P.K., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2021; pp. 617–638. ISBN 978-3-030-68501-0. [[Google Scholar](#)]

28. Deshmane, V.G.; Islam, S.Z.; Bhawe, R.R. Selective Recovery of Rare Earth Elements from a Wide Range of E-Waste and Process Scalability of Membrane Solvent Extraction. *Environ. Sci. Technol.* **2020**, *54*, 550–558. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

29. Dunn, J.; Ritter, K.; Velázquez, J.M.; Kendall, A. Should High-cobalt EV Batteries Be Repurposed? Using LCA to Assess the Impact of Technological Innovation on the Waste Hierarchy. *J. Ind. Ecol.* **2023**, *27*, 1277–1290. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

30. Dupont, D.; Binnemans, K. Recycling of Rare Earths from NdFeB Magnets Using a Combined Leaching/Extraction System Based on the Acidity and Thermomorphism of the Ionic Liquid [Hbet][Tf₂N]. *Green Chem.* **2015**, *17*, 2150–2163. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

31. Emil-Kaya, E.; Uysal, E.; Dikmetas, D.N.; Karbancioğlu-Güler, F.; Gürmen, S.; Friedrich, B. Development of a Near-Zero-Waste Valorization Concept

for Waste NdFeB Magnets: Production of Antimicrobial Fe Alginate Beads via Adsorption and Recovery of High-Purity Rare-Earth Elements. *ACS Omega* **2024**, 9, 6442–6454. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

32. Erust, C.; Akcil, A.; Tuncuk, A.; Deveci, H.; Yazici, E.Y. A Multi-Stage Process for Recovery of Neodymium (Nd) and Dysprosium (Dy) from Spent Hard Disc Drives (HDDs). *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* **2021**, 42, 90–101. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

33. Erust, C.; Karacahan, M.K.; Uysal, T. Hydrometallurgical Roadmaps and Future Strategies for Recovery of Rare Earth Elements. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* **2023**, 44, 436–450. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

34. Fokina, S.B.; Petrov, G.V.; Sizyakova, E.V.; Andreev, Y.V.; Kozlovskaya, A.E. Process Solutions of Zinc-Containing Waste Disposal in Steel Industry. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* **2019**, 10, 2083–2089. [[Google Scholar](#)]

35. Fujita, Y.; McCall, S.K.; Ginosar, D. Recycling Rare Earths: Perspectives and Recent Advances. *MRS Bull.* **2022**, 47, 283–288. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

36. Geng, Y.; Sarkis, J.; Bleischwitz, R. How to Build a Circular Economy for Rare-Earth Elements. *Nature* **2023**, 619, 248–251. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

37. Gergoric, M.; Ekberg, C.; Foreman, M.R.S.J.; Steenari, B.-M.; Retegan, T. Characterization and Leaching of Neodymium Magnet Waste and Solvent Extraction of the Rare-Earth Elements Using TODGA. *J. Sustain. Metall.* **2017**, 3, 638–645. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

38. Gergoric, M.; Ravaux, C.; Steenari, B.-M.; Espegren, F.; Retegan, T. Leaching and Recovery of Rare-Earth Elements from Neodymium Magnet Waste Using Organic Acids. *Metals* **2018**, 8, 721. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

39. Giese, E.C. E-Waste Mining and the Transition toward a Bio-Based Economy: The Case of Lamp Phosphor Powder. *MRS Energy Sustain.* **2022**, 9, 494–500. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

40. Gkika, D.A.; Chalaris, M.; Kyzas, G.Z. Review of Methods for Obtaining Rare Earth Elements from Recycling and Their Impact on the Environment and Human Health. *Processes* **2024**, *12*, 1235. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
41. Good, N.M.; Kang-Yun, C.S.; Su, M.Z.; Zytneck, A.M.; Vu, H.N.; Grace, J.M.; Nguyen, H.H.; Park, D.M.; Skovran, E.; Fan, M.; et al. Scalable Bio-Platform to Recover Critical Metals from Complex Waste Sources. *bioRxiv* **2023**. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Gradwohl, A.; Windisch, J.; Weissensteiner, M.; Keppler, B.K.; Kandioller, W.; Jirsa, F. Extraction of Rare Earth Elements from Aqueous Solutions Using the Ionic Liquid Trihexyltetradecylphosphonium 3-Hydroxy-2-Naphthoate. *RSC Adv.* **2023**, *13*, 24899–24908. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
43. Gutenthaler, S.M.; Tsushima, S.; Steudtner, R.; Gailer, M.; Hoffmann-Röder, A.; Drobot, B.; Daumann, L.J. Lanmodulin Peptides—Unravelling the Binding of the EF-Hand Loop Sequences Stripped from the Structural Corset. *Inorg. Chem. Front.* **2022**, *9*, 4009–4021. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
44. Han, K.N. Editorial for Special Issue “Leaching of Rare Earth Elements from Various Sources”. *Minerals* **2021**, *11*, 164. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
45. Han, P.; Teo, W.Z.; Yew, W.S. Biologically Engineered Microbes for Bioremediation of Electronic Waste: Wayposts, Challenges and Future Directions. *Eng. Biol.* **2022**, *6*, 23–34. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
46. Hanitio, E.W.; Lutfhyansyah, N.R.; Efendi, B.M.; Mardiyati, Y.; Steven, S. From Electronic Waste to 3D-Printed Product, How Multiple Recycling Affects High-Impact Polystyrene (HIPS) Filament Performances. *Materials* **2023**, *16*, 3412. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
47. Heim, J.W.; Vander Wal, R.L. NdFeB Permanent Magnet Uses, Projected Growth Rates and Nd Plus Dy Demands across End-Use Sectors through 2050: A Review. *Minerals* **2023**, *13*, 1274. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
48. Hernández-López, A.M.; Guillemet-Fritsch, S.; Valdez-Nava, Z.; Aguilar-Garib, J.A.; Tenailleau, C.; Dufour, P.; Demai, J.-J.; Durand, B. Influence

Of Y₂O₃ On The Structure Of Y₂O₃-Doped BaTiO₃ Powder And Ceramics. *Int. J. Eng. Res. Sci.* **2018**, 4, 7–11. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

49. Hong, C.; Tang, Q.; Liu, S.; Kim, H.; Liu, D. A Two-Step Bioleaching Process Enhanced the Recovery of Rare Earth Elements from Phosphogypsum. *Hydrometallurgy* **2023**, 221, 106140. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

50. [https://pidruchniki.com/16631116/ekologiya/zabrudnennya_navkolish_nogo_seredovischa](https://pidruchniki.com/16631116/ekologiya/zabrudnennya_navkolish_nogo_seredovischa_promislovistyu/) _promislovistyu/ Металургія.

51. Hua, C.; Chen, L.; Liu, C.; Yang, C. The Effect of Incentive Policies on the Diffusion of Construction and Demolition Waste Recycling: A Government Perspective. *Waste Manag. Res.* **2024**. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

52. Huang, C.; Wang, Y.; Huang, B.; Dong, Y.; Sun, X. The Recovery of Rare Earth Elements from Coal Combustion Products by Ionic Liquids. *Miner. Eng.* **2019**, 130, 142–147. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

53. Islam, M.K.; Somerville, M.; Pownceby, M.I.; Tardio, J.; Haque, N.; Bhargava, S. Deposition of Metals from E-Waste PCBs towards Alloy and Slag Phases during Smelting Using CaO-Al₂O₃-SiO₂-B₂O₃ Slags. *Minerals* **2023**, 13, 727. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

54. Javed, A.; Singh, J. Process Intensification for Sustainable Extraction of Metals from E-Waste: Challenges and Opportunities. *Env. Sci. Pollut. Res.* **2023**, 31, 9886–9919. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

55. Jiang, T.; Singh, S.; Dunn, K.A.; Liang, Y. Optimizing Leaching of Rare Earth Elements from Red Mud and Spent Fluorescent Lamp Phosphors Using Levulinic Acid. *Sustainability* **2022**, 14, 9682. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

56. Jin, H.; Reed, D.W.; Thompson, V.S.; Fujita, Y.; Jiao, Y.; Crain-Zamora, M.; Fisher, J.; Scalzone, K.; Griffel, M.; Hartley, D.; et al. Sustainable Bioleaching of Rare Earth Elements from Industrial Waste Materials Using Agricultural Wastes. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2019**, 7, 15311–15319. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

57. Johnson, M.; Khatoon, A.; Fitzpatrick, C. Application of AI and Machine Vision to Improve Battery Detection and Recovery in E-Waste Management. In Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, Maldives, 16–18 November 2022; pp. 1–6. [[Google Scholar](#)]

58. Jyothi, R.K.; Chung, K.W.; Kim, C.-J.; Yoon, H.-S. Recovery of Rare Earth Elements from Waste Permanent Magnets Leach Liquors. In *Rare Metal Technology 2020*; Azimi, G., Forsberg, K., Ouchi, T., Kim, H., Alam, S., Baba, A.A., Eds.; The Minerals, Metals & Materials Series; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 335–345. ISBN 978-3-030-36757-2. [[Google Scholar](#)]

59. Kaim, V.; Rintala, J.; He, C. Selective Recovery of Rare Earth Elements from E-Waste via Ionic Liquid Extraction: A Review. *Sep. Purif. Technol.* **2023**, *306*, 122699. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

60. Kaufmann, L.; Carter, C.R.; Rauer, J. The Coevolution of Relationship Dominant Logic and Supply Risk Mitigation Strategies. *J Bus. Logist.* **2016**, *37*, 87–106. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

61. Kaya, M. An Overview of NdFeB Magnets Recycling Technologies. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* **2024**, *46*, 100884. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

62. Keith-Roach, M.; Grundfelt, B.; Höglund, L.O.; Kousa, A.; Pohjolainen, E.; Magistrati, P.; Aggelatou, V.; Olivieri, N.; Ferrari, A. Environmental Legislation and Best Practice in the Emerging European Rare Earth Element Industry. In *Rare Earths Industry*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; pp. 279–291. ISBN 978-0-12-802328-0. [[Google Scholar](#)]

63. Khlifat, M.; Al-yamani, A.; El-hamad, H.; Al-thyabat, S. Rare Earth Elements (Ree) Extraction From Phosphate Fertilizers Waste. In Proceedings of the Qatar Foundation Annual Research Conference Proceedings, Doha Qatar, 18–19 November 2014; Volume 2014. [[Google Scholar](#)]

64. Ku, A.Y.; Setlur, A.A.; Loudis, J. Impact of Light Emitting Diode Adoption on Rare Earth Element Use in Lighting: Implications for Yttrium,

Europium, and Terbium Demand. *Electrochem. Soc. Interface* **2015**, 24, 45.

[[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

65. Kumari, S.; Roy, T.; Chakladar, S.; Kumar, A.; Arif, M.; Mohanty, A.; Kundu, R.; Chakravarty, S. Distribution, Mode of Occurrence, and Significance of Rare-Earth Elements in Coal from Samaleswari Open Cast Coal Blocks, Odisha, India with Their Provenance and Paleodepositional Environment. *Environ. Earth Sci.* **2023**, 82, 130. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

66. Kunanusont, N.; Zhang, J.; Watada, K.; Shimoyama, Y.; Azimi, G. Effect of Organophosphorus Ligands on Supercritical Extraction of Neodymium from NdFeB Magnet. *J. Supercrit. Fluids* **2021**, 170, 105128. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

67. Kusrini, E.; Nurani, Y.; Bahari, Z. Extraction of Rare Earth Elements from Low-Grade Bauxite via Precipitation Reaction. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, 334, 012052. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

68. Leal Filho, W.; Kotter, R.; Özuyar, P.G.; Abubakar, I.R.; Eustachio, J.H.P.P.; Matandirotya, N.R. Understanding Rare Earth Elements as Critical Raw Materials. *Sustainability* **2023**, 15, 1919. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

69. Levina, A.V.; Fedorov, A.Y.; Fedorova, M.I. The Interphase Distribution of Light REE Ce(III) and La(III) in System Based on PEG-1500–NaNO₃–H₂O with the Quaternary Ammonium Base Addition. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2022**, 1212, 012023. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

70. Lhamo, P.; Mahanty, B. Bioleaching of Rare Earth Elements from Industrial and Electronic Wastes: Mechanism and Process Efficiency. In *Environmental Technologies to Treat Rare Earth Element Pollution: Principles and Engineering*; Sinharoy, A., Lens, P.N.L., Eds.; IWA Publishing: London, UK, 2022; pp. 207–226. ISBN 978-1-78906-223-6. [[Google Scholar](#)]

71. Li, S.; Ji, B.; Zhang, W. Rare Earth Element Recovery and Hydrochar Evaluation from Hyperaccumulator by Acid Leaching and Microwave-Assisted Hydrothermal Carbonization. *Minerals* **2024**, 14, 277. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

72. Liao, C.; Li, Z.; Zeng, Y.; Chen, J.; Zhong, L.; Wang, L. Selective Extraction and Recovery of Rare Earth Metals from Waste Fluorescent Powder Using Alkaline Roasting-Leaching Process. *J. Rare Earths* **2017**, *35*, 1008–1013. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
73. Libralato, G.; Davranche, M.; Vantelon, D.; Bau, M.; Johannesson, K.H. Editorial: Further Rare Earth Elements Environmental Dissemination: Observation, Analysis, and Impacts. *Front. Earth Sci.* **2023**, *11*, 1182827. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
74. Liu, Y.; Sohn, S.H.; Lee, M.S. Methods for the Substitution of Common Saponification Systems for the Solvent Extraction of REEs. *Geosystem Eng.* **2017**, *20*, 111–118. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
75. Lorek, E.; Lorek, P. Social Attitudes towards Electronic Waste and the Implementation of Circular Economy Principles. *Econ. Environ.* **2023**, *83*, 325–337. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
76. Makombe, M.; Van Der Horst, C.; Somerset, V. Improved Borate Fusion Technique for Determination of Rare Earth Elements in Electronic Waste Components. *Environ. Technol.* **2023**, *44*, 1047–1060. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
77. Martin Armstrong Infographic: China Dominates the Rare Earth Market. Available online: <https://www.statista.com/chart/29114/rare-earth-reo-reserves-and-production> (accessed on 23 July 2024).
78. McNulty, T.; Hazen, N.; Park, S. Processing the Ores of Rare-Earth Elements. *MRS Bull.* **2022**, *47*, 258–266. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
79. Mishra, S.; Ghosh, S.; Van Hullebusch, E.D.; Singh, S.; Das, A.P. A Critical Review on the Recovery of Base and Critical Elements from Electronic Waste-Contaminated Streams Using Microbial Biotechnology. *Appl. Biochem. Biotechnol.* **2023**, *195*, 7859–7888. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
80. Moghise, M.; Pourrahim, M.; Rezai, B.; Gharabaghi, M. Concentration and Recycling of Rare Earth Elements (REEs) from Iron Mine Waste Using a

Combination of Physical Separation Methods. *J. Min. Environ.* **2016**, *7*, 195–203.

[[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

81. Mudali, U.K.; Patil, M.; Saravanabhavan, R.; Saraswat, V.K. Review on E-Waste Recycling: Part II—Technologies for Recovery of Rare Earth Metals. *Trans Indian Natl. Acad. Eng.* **2021**, *6*, 613–631. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

82. München, D.D.; Stein, R.T.; Veit, H.M. Rare Earth Elements Recycling Potential Estimate Based on End-of-Life NdFeB Permanent Magnets from Mobile Phones and Hard Disk Drives in Brazil. *Minerals* **2021**, *11*, 1190. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

83. Nicol, S.; Hogg, B.; Mendoza, O.; Nikolic, S. Extraction and Recovery of Critical Metals from Electronic Waste Using ISASMELT™ Technology. *Processes* **2023**, *11*, 1012. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

84. Niu, B.; E, S.; Wang, X.; Xu, Z.; Qin, Y. Intelligent Leaching Rare Earth Elements from Waste Fluorescent Lamps. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2024**, *121*, e2308502120. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

85. Ohene Opare, E.; Mirkouei, A. Environmental and Economic Assessment of a Portable E-Waste Recycling and Rare Earth Elements Recovery Process. In Proceedings of the Volume 5: 26th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference (DFMLC), Virtual, Online, 17–19 August 2021; p. V005T05A007. [[Google Scholar](#)]

86. Önal, M.A.R.; Binnemans, K. Recovery of Rare Earths from Waste Cathode Ray Tube (CRT) Phosphor Powder by Selective Sulfation Roasting and Water Leaching. *Hydrometallurgy* **2019**, *183*, 60–70. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

87. Opare, E.O.; Struhs, E.; Mirkouei, A. A Comparative State-of-Technology Review and Future Directions for Rare Earth Element Separation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *143*, 110917. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

88. Ormerod, J.; Karati, A.; Baghel, A.P.S.; Prodius, D.; Nlebedim, I.C. Sourcing, Refining and Recycling of Rare-Earth Magnets. *Sustainability* **2023**, *15*, 14901. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
89. Owusu-Fordjour, E.Y.; Yang, X. Bioleaching of Rare Earth Elements Challenges and Opportunities: A Critical Review. *J. Environ. Chem. Eng.* **2023**, *11*, 110413. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
90. Papavasileiou, A.V.; Menelaou, M.; Sarkar, K.J.; Sofer, Z.; Polavarapu, L.; Mourdikoudis, S. Ferromagnetic Elements in Two-Dimensional Materials: 2D Magnets and Beyond. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, *34*, 2309046. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
91. Pathak, A.; Kothari, R.; Vinoba, M.; Habibi, N.; Tyagi, V.V. Fungal Bioleaching of Metals from Refinery Spent Catalysts: A Critical Review of Current Research, Challenges, and Future Directions. *J. Environ. Manag.* **2021**, *280*, 111789. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
92. Pawar, G.; Ewing, R.C. Recent Advances in the Global Rare-Earth Supply Chain. *MRS Bull.* **2022**, *47*, 244–249. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
93. Peiravi, M.; Dehghani, F.; Ackah, L.; Baharlouei, A.; Godbold, J.; Liu, J.; Mohanty, M.; Ghosh, T. A Review of Rare-Earth Elements Extraction with Emphasis on Non-Conventional Sources: Coal and Coal Byproducts, Iron Ore Tailings, Apatite, and Phosphate Byproducts. *Min. Metall. Explor.* **2021**, *38*, 1–26. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
94. Peng, Z.; Mackey, P.J. New Developments in Pyrometallurgy. *JOM* **2013**, *65*, 1550–1551. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
95. Petrova, V. Exploring the Opportunities for Sustainable Management of Critical Raw Materials in the Circular Economy. *Eurasia Proc. Sci. Technol. Eng. Math.* **2023**, *26*, 664–671. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
96. Pineda-Vásquez, T.; Rendón-Castrillón, L.; Ramírez-Carmona, M.; Ocampo-López, C. From E-Waste to High-Value Materials: Sustainable Synthesis of Metal, Metal Oxide, and MOF Nanoparticles from Waste Printed Circuit Boards. *Nanomaterials* **2023**, *14*, 69. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

97. Pinto, J.; Col3nia, J.; Abdolvaseei, A.; Vale, C.; Henriques, B.; Pereira, E. Algal Sorbents and Prospects for Their Application in the Sustainable Recovery of Rare Earth Elements from E-Waste. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2023**, *30*, 74521–74543. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
98. Pyrgaki, K.; Gemeni, V.; Karkalis, C.; Koukouzas, N.; Koutsovitis, P.; Petrounias, P. Geochemical Occurrence of Rare Earth Elements in Mining Waste and Mine Water: A Review. *Minerals* **2021**, *11*, 860. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
99. Rajput, R.S.; Singh, A.; Mishra, M.K. A Comprehensive Review of Water Treatment Methods for Heavy Metal Ion Removal from Wastewater. *J. Adv. Zool.* **2023**, *44*, 1508–1519. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
100. Ramprasad, C.; Gwenzi, W.; Chaukura, N.; Izyan Wan Azelee, N.; Upamali Rajapaksha, A.; Naushad, M.; Rangabhashiyam, S. Strategies and Options for the Sustainable Recovery of Rare Earth Elements from Electrical and Electronic Waste. *Chem. Eng. J.* **2022**, *442*, 135992. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
101. Rasheed, M.Z.; Song, M.; Park, S.; Nam, S.; Hussain, J.; Kim, T.-S. Rare Earth Magnet Recycling and Materialization for a Circular Economy—A Korean Perspective. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 6739. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
102. Rasoulnia, P.; Barthen, R.; Lakaniemi, A.-M. A Critical Review of Bioleaching of Rare Earth Elements: The Mechanisms and Effect of Process Parameters. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **2021**, *51*, 378–427. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
103. Romero, J.L.; Tabelin, C.B.; Park, I.; Alorro, R.D.; Zoleta, J.B.; Silva, L.C.; Arima, T.; Igarashi, T.; Mhandu, T.; Ito, M.; et al. Modified Diglycolamide Resin: Characterization and Potential Application for Rare Earth Element Recovery. *Minerals* **2023**, *13*, 1330. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
104. Rybak, A.; Rybak, A. Characteristics of Some Selected Methods of Rare Earth Elements Recovery from Coal Fly Ashes. *Metals* **2021**, *11*, 142. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
105. Sabbir, M.M.; Khan, T.T.; Das, A.; Akter, S.; Hossain, M.A. Understanding the Determinants of Consumers' Reverse Exchange Intention as an

Approach to e-Waste Recycling: A Developing Country Perspective. *Asia-Pac. J. Bus. Adm.* **2023**, *15*, 411–439. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

106. Sani, S.A.; Haris, A.M. A Microbial Technology Approach Using Bioleaching for Low Grade Metals Extraction - a Review. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2022**, *1103*, 012019. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

107. Santoso, S.; Yuri M Zagloel, T.; Ardi, R.; Suzianti, A. Estimating the Amount of Electronic Waste Generated in Indonesia: Population Balance Model. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2019**, *219*, 012006. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

108. Shanthi Bhavan, J.; Joy, J.; Pazhani, A. Identification and Recovery of Rare Earth Elements from Electronic Waste: Material Characterization and Recovery Strategies. *Mater. Today Commun.* **2023**, *36*, 106921. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

109. Sharma, A.; Saini, Y.; Singh, A.K.; Rathi, A. Recent Advancements and Technological Challenges in Flexible Electronics: Mm Wave Wearable Array for 5G Networks. In Proceedings of the A Two-Day Conference on Flexible Electronics for Electric Vehicles, Jaipur, India, 5–6 March 2020; p. 020007. [[Google Scholar](#)]

110. Shule, Q.; Xue, B.; Jianguo, C.; Peng, C.; Wenyuan, W. Clean Metallurgy and Technical Progress of Light Rare Earth Minerals. *Can. Metall. Q.* **2024**, *63*, 538–550. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

111. Sinclair, N.S.; Wasalathanthri, R.; Mainali, B.; Holcombe, B.; Baker, A.; Kim, E.; Orhan, A.; Mccall, S.; Akolkar, R. (Invited) Rare Earth Metal Production Via Chloride Based Molten-Salt Electrolysis. *ECS Meet. Abstr.* **2023**, *MA2023-01*, 1522. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

112. Singh, A.; Čížková, M.; Náhlík, V.; Mezricky, D.; Schild, D.; Rucki, M.; Vítová, M. Bio-Removal of Rare Earth Elements from Hazardous Industrial Waste of CFL Bulbs by the Extremophile Red Alga *Galdieria Sulphuraria*. *Front. Microbiol.* **2023**, *14*, 1130848. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

113. Slowinski, G.; Latimer, D.; Mehlman, S. Dealing with Shortages of Critical Materials. *Res. Technol. Manag.* **2013**, *56*, 18–24. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
114. Smol, M. Circular Economy in Wastewater Treatment Plant—Water, Energy and Raw Materials Recovery. *Energies* **2023**, *16*, 3911. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
115. Suin, S. Revisiting E-waste management: Global scenario, strategies, and sustainable development. *Environ. Res. Technol.* **2024**. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
116. Swaleh, Sadiya & Usmani, Nazura & Student, Ph. (2016). Impact of Heavy Metals in Environment: A Review. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2016.0509010>
117. Tahiri Alaoui, Y.; Semlali Aouragh Hassani, N. Leaching Process for Terbium Recovery from Linear Tube Fluorescent Lamps: Optimization by Response Surface Methodology. *Env. Sci. Pollut. Res.* **2020**, *27*, 45527–45538. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
118. Thompson, V.S.; Gupta, M.; Jin, H.; Vahidi, E.; Yim, M.; Jindra, M.A.; Nguyen, V.; Fujita, Y.; Sutherland, J.W.; Jiao, Y.; et al. Techno-Economic and Life Cycle Analysis for Bioleaching Rare-Earth Elements from Waste Materials. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2018**, *6*, 1602–1609. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
119. Tian, S.; Zhang, L.; Xie, R.; Lu, A.; Huang, Y.; Xing, H.; Chen, X. The Electronic, Magnetic and Optical Properties of GaN Monolayer Doped with Rare-Earth Elements. *Solid State Commun.* **2023**, *371*, 115292. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
120. Tirado, D.F.; Cabañas, A.; Calvo, L. Modelling and Scaling-Up of a Supercritical Fluid Extraction of Emulsions Process. *Processes* **2023**, *11*, 1063. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
121. Tunali, M.; Tunali, M.M.; Yenigun, O. Characterization of Different Types of Electronic Waste: Heavy Metal, Precious Metal and Rare Earth Element

Content by Comparing Different Digestion Methods. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2021**, 23, 149–157. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

122. Usuki, T.; Khomenko, M.; Sokolov, A.; Bokova, M.; Ohara, K.; Kassem, M.; Tverjanovich, A.; Bychkov, E. Supercritical Gallium Trichloride in Oxidative Metal Recycling: Ga₂ Cl₆ Dimers vs GaCl₃ Monomers and Rheological Behavior. *Inorg. Chem.* **2024**, 63, 7640–7651. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

123. Verma, G.; Hostert, J.; Summerville, A.A.; Robang, A.S.; Garcia Carcamo, R.; Paravastu, A.K.; Getman, R.B.; Duval, C.E.; Renner, J. Investigation of Rare Earth Element Binding to a Surface-Bound Affinity Peptide Derived from EF-Hand Loop I of Lanmodulin. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2024**, 16, 16912–16926. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

124. Viana, L.N.; Soares, A.P.S.; Guimarães, D.L.; Rojano, W.J.S.; Saint’Pierre, T.D. Fluorescent Lamps: A Review on Environmental Concerns and Current Recycling Perspectives Highlighting Hg and Rare Earth Elements. *J. Environ. Chem. Eng.* **2022**, 10, 108915. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

125. Wang, G.; Xu, J.; Ran, L.; Zhu, R.; Ling, B.; Liang, X.; Kang, S.; Wang, Y.; Wei, J.; Ma, L.; et al. A Green and Efficient Technology to Recover Rare Earth Elements from Weathering Crusts. *Nat. Sustain.* **2023**, 6, 81–92. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

126. Wang, K. Advances in E-Waste Recycling: Physical and Chemical Treatment Methods. *Highlights Sci. Eng. Technol.* **2023**, 73, 378–383. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

127. Wang, K.; Adidharma, H.; Radosz, M.; Wan, P.; Xu, X.; Russell, C.K.; Tian, H.; Fan, M.; Yu, J. Recovery of Rare Earth Elements with Ionic Liquids. *Green Chem.* **2017**, 19, 4469–4493. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

128. Wang, Y.; Ziemkiewicz, P.; Noble, A. A Hybrid Experimental and Theoretical Approach to Optimize Recovery of Rare Earth Elements from Acid Mine Drainage Precipitates by Oxalic Acid Precipitation. *Minerals* **2022**, 12, 236. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

129. Wu, Y.F.; Li, R.Q.; Zhang, Q.J.; Wang, W. Extraction of Rare Earth Elements from Waste Trichromatic Fluorescent Phosphors. *Adv. Mater. Res.* **2013**, *788*, 279–282. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
130. Xu, T.; Zheng, X.; Ji, B.; Xu, Z.; Bao, S.; Zhang, X.; Li, G.; Mei, J.; Li, Z. Green Recovery of Rare Earth Elements under Sustainability and Low Carbon: A Review of Current Challenges and Opportunities. *Sep. Purif. Technol.* **2024**, *330*, 125501. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
131. Xue, D.; Sun, C. 4f Chemistry towards Rare Earth Materials Science and Engineering. *Sci. China Technol. Sci.* **2017**, *60*, 1767–1768. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
132. Yadav, J.; Sarker, S.K.; Bruckard, W.; Jegatheesan, V.; Haque, N.; Singh, N.; Pramanik, B.K. Greening the Supply Chain: Sustainable Approaches for Rare Earth Element Recovery from Neodymium Iron Boron Magnet Waste. *J. Environ. Chem. Eng.* **2024**, *12*, 113169. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
133. Yang, Y.; Lan, C.; Guo, L.; An, Z.; Zhao, Z.; Li, B. Recovery of Rare-Earth Element from Rare-Earth Permanent Magnet Waste by Electro-Refining in Molten Fluorides. *Sep. Purif. Technol.* **2020**, *233*, 116030. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
134. Yang, Y.; Walton, A.; Sheridan, R.; Güth, K.; Gauß, R.; Gutfleisch, O.; Buchert, M.; Steenari, B.-M.; Van Gerven, T.; Jones, P.T.; et al. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *J. Sustain. Metall.* **2017**, *3*, 122–149. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
135. Yao, Y.; Farac, N.F.; Azimi, G. Supercritical Fluid Extraction of Rare Earth Elements from Nickel Metal Hydride Battery. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2018**, *6*, 1417–1426. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
136. Ye, Q.; Jin, X.; Zhu, B.; Gao, H.; Wei, N. Lanmodulin-Functionalized Magnetic Nanoparticles as a Highly Selective Biosorbent for Recovery of Rare Earth Elements. *Environ. Sci. Technol.* **2023**, *57*, 4276–4285. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

137. Yin, T.; Xue, Y.; Yan, Y.; Ma, Z.; Ma, F.; Zhang, M.; Wang, G.; Qiu, M. Recovery and Separation of Rare Earth Elements by Molten Salt Electrolysis. *Int. J. Min. Met. Mater.* **2021**, *28*, 899–914. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
138. Zhang, H.; Gao, Y. Polymeric Materials for Rare Earth Elements Recovery. *Gels* **2023**, *9*, 775. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
139. Zhang, J.; Anawati, J.; Yao, Y.; Azimi, G. Supercritical Fluid Extraction for Urban Mining of Rare Earth Elements. In *Rare Metal Technology 2019*; Azimi, G., Kim, H., Alam, S., Ouchi, T., Neelameggham, N.R., Baba, A.A., Eds.; The Minerals, Metals & Materials Series; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 63–72. ISBN 978-3-030-05739-8. [[Google Scholar](#)]
140. Zhang, J.; Azimi, G. Supercritical Fluid Extraction of Rare Earth Elements from Waste Fluorescent Lamp. In *Rare Metal Technology 2020*; Azimi, G., Forsberg, K., Ouchi, T., Kim, H., Alam, S., Baba, A.A., Eds.; The Minerals, Metals & Materials Series; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 93–105. ISBN 978-3-030-36757-2. [[Google Scholar](#)]
141. Zhang, T.; Dao, J.; Wang, J.; Guo, Y.; Wan, R.; Li, C.; Zhou, X.; Zhang, Z. Highly Efficient Recovery of Waste $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ Cathode Materials Using a Process Involving Pyrometallurgy and Hydrometallurgy. *Front. Environ. Sci. Eng.* **2024**, *18*, 25. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
142. Zhao, W. An Overview of Emerging Trends in Consumer E-Waste Disposal Behavior in the Context of Carbon Neutrality. *SHS Web Conf.* **2023**, *163*, 02012. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
143. Zhao, X.; Khelifi, F.; Casale, M.; Cavallo, A.; Padoan, E.; Yang, K.; Dino, G.A. Critical Raw Materials Supply: Challenges and Potentialities to Exploit Rare Earth Elements from Siliceous Stones and Extractive Waste. *Resources* **2024**, *13*, 97. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
144. Вплив об'єктів чорної металургії. Забруднення атмосфери. Інтернет – ресурс Режим доступу: https://pidruchniki.com/70482/ekologiya/vpliv_dovkillya.

145. Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН 2.2.7.029-99) Державна санепідем.служба, МОЗ України; Правила, Норми, Перелік від 01.07.1999 № 29. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0029588-99#Text>.

146. Закон України «Про відходи» від 05.03.1998 № 187/98-ВР. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-%D0%B2%D1%80#Text>.

147. Про затвердження «Правил пожежної безпеки в Україні» МВС України; Наказ, Правила, Форма від 30.12.2014 № 1417. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text>.

ДОДАТОК А

Наумов Я.О.,

здобувач вищої освіти освітнього ступеня «магістр»
спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Державний університет «Житомирська політехніка»,

naumovaroslav81@gmail.com**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 сталій 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 CO₂: 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.

Таблиця 1

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 CO₂ і енергетичних витрат для різних методів видобутку рідкоземельних металів:

Метод видобутку	Викиди CO ₂ (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 CO₂ та енерговитрати, роблячи їх більш придатними для сталого розвитку в порівнянні з традиційними методами, такими як відкритий кар'єр та підземний видобуток.[2]

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.