МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

О.В. Ложніков
А.В. Павличенко
О.О. Шустов
Н.І. Деревягіна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КРИТИЧНОЮ МІНЕРАЛЬНОЮ СИРОВИНОЮ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ

Навчальний посібник

Дніпро
НТУ «ДП»
2026

УДК: 622.3:553.04:504(075.8)
Л 71

Рекомендовано вченою радою НТУ "Дніпровська політехніка" як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра спеціальностей Е2 Екологія, Е4 Науки про Землю; G2 Технології захисту навколишнього середовища; G16 Гірництво та нафтогазові технології (протокол № 9 від 15.09.2026 р.)

Рецензенти:

Щокін В.П. – д-р техн. наук, проф. (Науково-дослідний гірничорудний інститут);
Медведєва О.О. – д-р техн. наук (Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України).

Л 71 Ложніков О.В., Павличенко А.В., Шустов О.О., Деревягіна Н.І. Забезпечення критичною мінеральною сировиною Європейського Союзу: навч. посіб. / М-во освіти і науки України, НТУ «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2026. 287 с.

ISBN

У навчальному посібнику викладено основні засади освоєння критичної мінеральної сировини. Наведено основні класифікації стратегічної та критичної сировини в Україні та ЄС. У посібнику розглянуто загальні відомості про залягання, видобуток та переробку критичної мінеральної сировини в світі. Викладено інформацію щодо споживання конкретних критичних компонентів в основних високотехнологічних галузях економіки. У посібнику розглянуто головні виклики для навколишнього середовища, які виникають внаслідок видобутку та збагачення критичних мінеральних ресурсів. Подано практичні завдання та тестовий контроль знань, які можна використовувати для закріплення матеріалу, а також для оцінювання знань за темами розділів посібника.

Навчальний посібник рекомендується здобувачам освітнього рівня магістра спеціальностей Е2 Екологія; Е4 Науки про Землю; G2 Технології захисту навколишнього середовища; G16 Гірництво та нафтогазові технології.

УДК: 622.3:553.04:504(075.8)

ISBN

© О.В. Ложніков, А.В. Павличенко, О.О. Шустов, Н.І. Деревягіна, 2026
© НТУ «Дніпровська політехніка», 2026

ЗМІСТ

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ТЕРМІНОЛОГІЯ 8
СКОРОЧЕНІ ПОЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ТЕРМІНІВ 11
ПЕРЕДМОВА 13
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КРИТИЧНУ МІНЕРАЛЬНУ СИРОВИНУ 18
1.1. Загальні поняття 18
1.2. Класифікація стратегічної та критичної мінеральної сировини в Україні 20
1.3. Законодавча база для використання критичної мінеральної сировини в Європейському Союзі 22
1.4. Критичні технології для розвитку суспільства та промисловості 26
1.5. Ризики постачання критичної сировини в Європейський Союз 31
1.6. Основні види критичної мінеральної сировини в Україні 36
Контрольні запитання 38
Список рекомендованої літератури до розділу 1 39
РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ КРИТИЧНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ У ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЛУЗЯХ ЕКОНОМІКИ 40
2.1. Критична мінеральна сировина у новітніх технологіях 40
2.2. Удосконалена (літій-іонна) технологія акумулятора 43
2.3. Паливні елементи 47
2.4. Вітрогенератори 52
2.5. Виготовлення тягових двигунів 57
2.6. Сонячні електростанції 61
2.7. Робототехніка 67
2.8. Дрони (БПЛА) 72
2.9. Адитивні технології (3-Д друк) 77
2.10. Цифрові технології 81
Контрольні запитання 87
Список рекомендованої літератури до розділу 2 87

РОЗДІЛ 3. ВИДОБУТОК МЕТАЛЕВОЇ КРИТИЧНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ 88
3.1. Загальна класифікація критичної мінеральної сировини 88
3.2. Освоєння критичної мінеральної сировини з руд металів 89
3.2.1. Алюміній 89
3.2.2. Галій 92
3.2.3. Вісмут 94
3.3. Видобуток критичної мінеральної сировини з руд перехідних металів 96
3.3.1. Ванадій 96
3.3.2. Вольфрам 97
3.3.3. Гафній 99
3.3.4. Кобальт 102
3.3.5. Марганець 104
3.3.5. Мідь 107
3.3.6. Нікель 109
3.3.7. Ніобій 111
3.3.8. Скандій 112
3.3.9. Тантал 113
3.3.10. Титан 116
3.4. Метали платинової групи 118
3.4.1. Загальні відомості про метали платинової групи 118
3.4.2. Іридій 119
3.4.3. Паладій 121
3.4.4. Платина 123
3.4.5. Осмій 125
3.4.6. Родій 127
3.4.7. Рутеній 128
3.4. Критичні лужні та лужноземельні метали 130
3.4.1. Барит 130
3.4.2. Берилій 132
3.4.3. Літій 134
3.4.4. Магній 137
3.4.5. Стронцій 139
Контрольні запитання 140
Список рекомендованої літератури до розділу 3 141

РОЗДІЛ 4. ОСВОЄННЯ ЛЕГКИХ І ВАЖКИХ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ (ЛАНТАНОЇДІВ)..... 145
4.1. Загальні відомості про рідкісноземельні метали..... 145
4.2. Світове виробництво рідкісноземельних металів..... 149
4.3. Гірничо-геологічні умови залягання рідкісноземельних елементів..... 155
4.4. Технології освоєння рідкісноземельних елементів..... 159
4.5. Потенціал освоєння легких і важких рідкісноземельних елементів в Україні..... 161
Контрольні запитання:..... 174
Список рекомендованої літератури до розділу 4..... 175
РОЗДІЛ 5. ОСВОЄННЯ КРИТИЧНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ З МЕТАЛОЇДІВ..... 179
5.1. Основні відомості про металоїди..... 179
5.2. Бор/борат..... 180
5.3. Кремній (металевий)..... 182
5.4. Германій..... 184
5.5. Арсен (миш'як)..... 186
5.6. Стибій (сурма)..... 188
Контрольні запитання:..... 190
Список рекомендованої літератури до розділу 5..... 191
РОЗДІЛ 6. НЕМЕТАЛЕВА КРИТИЧНА МІНЕРАЛЬНА СИРОВИНА..... 193
6.1. Основні відомості про неметалеву критичну сировину..... 193
6.2. Неметали..... 194
6.2.1. Графіт..... 194
6.2.2. Фосфор..... 196
6.3. Гелій (благородний газ)..... 197
6.4. Критична сировина в мінералах..... 200
6.4.1. Польовий шпат..... 200
6.4.2. Флюорит (плавиковий шпат)..... 202
6.5. Критична мінеральна сировина в породах і корисних копалинах..... 204

6.5.1. Фосфатна порода 204
6.5.2. Коксівне вугілля 207
Контрольні запитання: 209
Список рекомендованої літератури до розділу 6 210
РОЗДІЛ 7. ВОДА ЯК СТРАТЕГІЧНИЙ РЕСУРС ПРИ ОСВОЄННІ КРИТИЧНИХ МІНЕРАЛІВ 211
7.1. Загальні відомості про використання води при освоєнні КМС 211
Контрольні запитання до розділу 7: 220
Список рекомендованої літератури до розділу 7: 220
РОЗДІЛ 8. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ВОДНОЇ РАМКОВОЇ ДИРЕКТИВИ ЄС ТА ЇХ ВИКОРИСТАННІ У ГІРНИЧО-ВИДОБУВНОМУ СЕКТОРІ 222
8.1. Мета, принципи та сфера застосування Водної рамкової директиви ЄС224
8.2. Принцип недопущення погіршення стану вод 226
8.3. Оцінка стану поверхневих і підземних вод 228
8.4. Моніторинг поверхневих і підземних вод 229
8.5. Басейновий принцип управління водними ресурсами у контексті видобутку критичної сировини 232
Контрольні запитання до розділу 8: 234
Список рекомендованої літератури до розділу 8: 235
РОЗДІЛ 9. БАСЕЙНОВИЙ ПРИНЦИП УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ НА ПРИКЛАДІ ГІРНИЧО-ВИДОБУВНИХ РЕГІОНІВ 236
9.1. Особливості формування водогосподарського навантаження у гірничо-видобувних регіонах 236
9.2. Практичні кейси басейнового управління у гірничих регіонах Європи . 239
9.3. Значення басейнового підходу для освоєння критичної мінеральної сировини 243
Контрольні запитання до розділу 9: 244
Список рекомендованої літератури до розділу 9: 244
РОЗДІЛ 10. ВОДНІ РИЗИКИ ПРИ ВИДОБУТКУ ТА ПЕРЕРОБЦІ КРИТИЧНИХ МІНЕРАЛІВ 246
10.1. Загальні відомості про водні ризики при освоєнні КМС 246

Контрольні запитання до розділу 10:.....249
Список рекомендованої літератури до розділу 10: 250
РОЗДІЛ 11. ЄВРОПЕЙСЬКІ ПРАКТИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ В УКРАЇНІ 251
11.1. Європейські підходи до управління водними ресурсами при освоєнні мінеральної сировини 251
11.2. Імплементація європейських підходів в Україні та перспективи розвитку 253
Контрольні запитання до розділу 11:.....256
Список рекомендованої літератури до розділу 11: 257
РОЗДІЛ 12. ПРАКТИЧНИЙ БЛОК 259
Завдання 1. Визначення кінцевої глибини розробки крутоспадного родовища критичної мінеральної сировини.....259
Завдання 2. Визначення кількості літієвого концентрату, отриманого при переробці руд родовища сподумену-петаліту 262
Завдання 3. Розрахунок терміну окупності капітальних витрат на розробку родовища титанових руд 264
Завдання 4. Визначення основних параметрів кар'єру родовища мідно-порфірових руд графічним та аналітичним методами.....274
ТЕСТОВИЙ КОНТРОЛЬ ЗНАНЬ.....278
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК 284

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ТЕРМІНОЛОГІЯ

1. Базові та нормативні поняття

- **Критична мінеральна сировина (КМС)** – корисні копалини, які мають високу економічну важливість для промисловості та одночасно характеризуються високим ризиком переривання постачання.
- **Стратегічна сировина** – мінеральні ресурси, критично необхідні для національної безпеки, оборонної промисловості та функціонування стратегічних секторів економіки.
- **Ризик постачання (Supply Risk)** – показник, що вимірює ймовірність дефіциту сировини через геополітичну нестабільність, концентрацію видобутку в одній країні або відсутність замінників.
- **Економічна важливість (Economic Importance)** – оцінка внеску конкретної мінеральної сировини у додану вартість промислових секторів країни чи регіону.
- **Закон ЄС про критичну сировину (Critical Raw Materials Act / CRMA)** – нормативний акт Європейського Союзу, що встановлює цілі щодо внутрішнього видобутку, переробки та диверсифікації джерел постачання КМС.
- **Енергетичний перехід (Decarbonization)** – глобальний процес переходу від викопного палива до відновлюваних джерел енергії, який є головним драйвером різкого зростання попиту на КМС.

2. Специфічні класи та види мінеральних ресурсів

- **Рідкісноземельні елементи (РЗЕ)** – група з 17 хімічно подібних металів (лантаноїди, скандій та ітрій), критично важливих для виробництва магнітів, електроніки та лазерів.
- **Важкі рідкісноземельні елементи (HREE)** – підгрупа рідкісних земель (від європію до лютецію, плюс ітрій), які є менш поширеними у природі та мають вищу ринкову вартість.
- **Легкі рідкісноземельні елементи (LREE)** – підгрупа рідкісних земель

(від лантану до гадолінію), які зустрічаються частіше, але мають вирішальне значення для неодимових магнітів.

- **Метали платинової групи (МПГ)** – сімейство з 6 благородних металів (рутеній, родій, паладій, осмій, іридій, платина), незамінних у каталізаторах та водневій енергетиці.
- **Акумуляторні метали** – група КМС (літій, кобальт, нікель, марганець, графіт), які є основними компонентами сучасних літій-іонних батарей для електромобілів.
- **Техногенні родовища КМС** – накопичення відходів видобутку, збагачення або металургійної переробки (шлами, терикони, хвости), які містять промислові концентрації критичних елементів.

3. Геологічна оцінка та управління надрами

- **Мінерально-сировинна база (МСБ)** – сукупність розвіданих та оцінених запасів корисних копалин і перспективних ресурсів країни, доступних для промислового освоєння.
- **Геолого-економічна оцінка (ГЕО)** – комплексне дослідження геологічних, технологічних та фінансових параметрів родовища для визначення доцільності його промислової розробки.
- **Перспективні ресурси** – обсяги корисних копалин, наявність яких у межах басейну чи рудного району припускається на основі сприятливих геологічних передумов.
- **Кодекс JORC** – міжнародний австралійський стандарт публічної звітності про результати геологорозвідувальних робіт, мінеральні ресурси та рудні запаси.
- **Шаблон CRIRSCO** – світова уніфікована система класифікації та звітності твердих корисних копалин, що об’єднує національні кодекси різних країн.

4. Ланцюги постачання, технології та екологія

- **Глобальний ланцюг доданої вартості (Value Chain)** – повний цикл трансформації КМС: від геологічної розвідки та видобутку руди до її

збагачення, металургійного рафінування та виробництва кінцевих високотехнологічних компонентів.

- **Рециклінг КМС (Вторинне вилучення)** – процес переробки відпрацьованих продуктів (наприклад, акумуляторів чи електроніки) з метою повторного повернення критичних металів у виробничий цикл.
- **Вторинна сировина (Urban Mining)** – концепція вилучення КМС із міських та промислових відходів (особливо з брухту електроніки WEEE) замість класичного видобутку з надр.
- **Ресурсоефективність** – технологічні підходи, спрямовані на зменшення кількості критичних матеріалів, що використовуються в одному виробі без втрати його характеристик.
- **Субституція (Заміщення)** – заміна дефіцитної критичної мінеральної сировини на більш доступні або менш ризиковані аналоги у виробничих процесах.
- **Екологічний, соціальний та корпоративний менеджмент (ESG)** – набір стандартів діяльності видобувних компаній, що враховує їхній вплив на довкілля та місцеві громади, що є критичним для сертифікації сировини.

5. Геополітика та ринкові механізми

- **Геополітична монополія** – ситуація на ринку КМС, коли видобуток або переробка певного металу зосереджені в одній країні (наприклад, домінування Китаю в переробці РЗЕ та графіту).
- **Диверсифікація постачання** – стратегія зниження ризиків шляхом закупівлі сировини у кількох незалежних географічних та політичних джерелах.
- **Експортні квоти на КМС** – державні обмеження на обсяги вивезення необробленої мінеральної сировини для стимулювання внутрішньої переробки або створення штучного дефіциту на світовому ринку.
- **Стратегічне резервування (Stockpiling)** – створення державою чи великими корпораціями фізичних запасів критичних металів на випадок раптового припинення імпорту або цінових шоків.

СКОРОЧЕНІ ПОЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ТЕРМІНІВ

1. Загальні поняття

- **КМС** – критична мінеральна сировина.
- **МСБ** – мінерально-сировинна база.
- **КК** – корисні копалини.
- **CRM** *(від англ. Critical Raw Materials)* – критична сировина (міжнародне маркування).
- **SRM** *(від англ. Strategic Raw Materials)* – стратегічна сировина.
- **CRMA** *(від англ. Critical Raw Materials Act)* – Закон ЄС про критичну сировину (базовий європейський регламент).

2. Специфічні класи сировини та елементів

- **РЗЕ** – рідкісноземельні елементи (найбільш критична група металів).
- **ЛРЗЕ** – легкі рідкісноземельні елементи *(англ. LREE)*.
- **ВРЗЕ** – важкі рідкісноземельні елементи *(англ. HREE)*.
- **МПГ** – метали платинової групи *(англ. PGM – платина, паладій, родій тощо)*.
- **РМ** – рідкісні метали (літій, берилій, тантал тощо).

3. Оцінка ресурсів та геологічна звітність

- **геолого-економічна оцінка (ГЕО)** – аналіз економічної доцільності розробки родовища.
- **перспективні ресурси (ПР)** – обсяги сировини, оцінені на основі загальних геологічних даних.
- **техногенні родовища (ТР)** – відходи видобутку та переробки, що містять корисні компоненти.
- **ГРР** – геологорозвідувальні роботи.

4. Показники ризику та ланцюги постачання

- **РП** – ризик постачання *(від англ. Supply Risk)*.
- **ВЕ** – зелена (енергетичний перехід) або відновлювана енергетика – головний драйвер попиту на КМС.

5. Організації, кодекси та стандарти

- **ДКЗ** – Державна комісія України по запасах корисних копалин.
- **Держгеонадра** – Державна служба геології та надр України.
- **ВРД** – Водна Рамкова Директива.
- **CRIRSCO** – Комітет із міжнародних стандартів звітності про запаси корисних копалин.
- **JORC** – Австралійський кодекс звітності про результати розвідки, мінеральні ресурси та рудні запаси (світовий стандарт).
- **USGS** – Геологічна служба США (головний аналітичний центр із моніторингу світових ресурсів КМС).

ПЕРЕДМОВА

Освітній проєкт «Забезпечення критичною мінеральною сировиною Європейського союзу» (Critical raw materials provision in the European Union – CRMPEU[1]) реалізується у рамках модуля Жан Моне (Jean Monnet Module) у 2023-2026 рр. Також це вибіркова освітня компонента для магістрів, що розроблена в НТУ «Дніпровська політехніка» і пов'язана зі студіями Європейського Союзу в рамках міжнародної програми Еразмус+.

В рамках дисципліни за вибором «Забезпечення критичною мінеральною сировиною Європейського союзу» відбувалося поширення інформації серед здобувачів вищої освіти щодо важливості раціонального поводження з критичною мінеральною сировиною, яка є основою сталого функціонування технологічних галузей економіки Європи і світу в цілому. Розроблена дисципліна спрямована на розвиток міждисциплінарної відкритості майбутніх експертів зі спеціальностей «Відкрита розробка родовищ», «Науки про Землю» та «Технології захисту навколишнього середовища», що дозволяє систематично та поглиблено розуміти технологічні та екологічні проблеми освоєння критичної мінеральної сировини, пом'якшуючи негативний вплив на природне середовище.

Реалізація проєкту виконувалася через співпрацю НТУ «ДП» з іншими ЗВО України та промисловими підприємствами при підготовці експертів нового покоління в галузі видобутку та переробки критичної мінеральної сировини. Цілі проєкту повністю відповідають політиці ЄС (European Commission, Brussels, 3.09.2020, Communication COM (2020), 474 final, Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability), а також Європейській зеленій угоді, Індустрії 4.0 тощо.

Враховуючи досвід країн ЄС, їх сучасні вимоги до захисту навколишнього середовища, національні технологічні, економічні та екологічні стандарти та

[1] *Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them*

тенденції розроблено навчальні матеріали для викладання та проведення курсів підвищення кваліфікації для промисловців та викладачів ЗВО.

Стійке забезпечення Європейського Союзу та України стратегічно важливою сировиною, що використовуються для таких ключових технологій і секторів, як відновлювана енергетика, цифрові технології, космос і оборона є однією з передумов для виходу на новий технологічний рівень та досягнення кліматичної стійкості у рамках європейського простору. Критична мінеральна сировина має велике економічне значення для світу і країн ЄС, а розвиток високоточних технологій неможливий без залучення нових ресурсів, тому в повній мірі залежить від ризику поставок.

Відповідно Industrial Strategy for the EU, при видобутку та постачанні критично важливої сировини, необхідно на перший план ставити питання безпеки та сталого підходу, що вимагає нових рішень та висококваліфікованих спеціалістів, конкурентоспроможних у європейському освітньому просторі.

Оскільки Україна є однією з провідних країн Європи з видобутку основних видів корисних копалин: залізної (4% світового виробництва) та марганцевої руди (10%), каоліну (18%), руд кольорових і рідкісних металів, кам'яної та калійної солі, феромарганецю, тощо, її залучення до міжнародних ресурсних проєктів є критично важливим. Вона має значні запаси критичної сировини: графіту 3 % від світових, літію – 5%, нікелю, кобальту – 0,1 %.

Забезпечення внутрішнього і зовнішнього ринку зазначеною сировиною є гарантією сталого розвитку Європейської промисловості, тому підготовка висококваліфікованих фахівців з надрокористування є спільним стратегічним завданням. Актуальність цього питання підвищується у зв'язку зі стрімким зростанням виробництва електрокарів, адже за останні 5 років їх виготовлення в світі збільшилося на 400 % з 1,5 до 6,5 млн од., і таке зростання прогнозується до 2040 року. Їх виготовлення неможливе без критичних мінералів (графіт, нікель, кобальт та літій), які знаходяться в надрах землі в дуже обмежених кількостях і потребують інноваційних технологій вилучення.

До критичних також відносяться титанові руди яких в Україні налічується до 20 % від світових запасів, а освоєння цієї сировини в країні на сьогодні

перебуває у невизначеному стані, оскільки родовища з простими умовами залягання практично відпрацьовані. Розробка нових ускладнюється значним обводненням, що потребує від фахівців розвитку і впровадження інноваційних підходів.

Розвиток технологічних прогресів сучасної Європи пов'язаний з постійним прискоренням споживання природних ресурсів, частина з яких в природі має суттєвий дефіцит. Для цього розробляються інноваційні технології, спрямовані на зменшення залежності від використання корисних копалин, які можуть лише обмежено задовольнити потреби промисловості. Використання критичної мінеральної сировини особливо потребують технології, які дозволяють виробляти відновлювальну енергію (сонце, вітер та інші). Тому для отримання технологічних засобів, що дозволяють зменшити споживання природних ресурсів, необхідне залучення значних об'ємів критичної мінеральної сировини. Перехід на зелені технології це довготривалий процес, який ще значний час потребуватиме викопних енергетичних, металевих та критичних мінеральних ресурсів. Таким чином, технологічна промисловість Європейського союзу ще довий час вимагатиме продукції гірничодобувної та мінерально-збагачувальної промисловості, особливо це стосується критичної мінеральної сировини для зменшення залежності від зовнішніх постачальників.

Проблема забезпечення Європи критичною сировиною посилюється наявністю потужної промислової бази, широкого спектру виробів для сучасного рівня життя суспільства. Сталий доступ до мінеральної сировини викликає занепокоєння як ЄС так і в усьому світі. Для популяризації проблеми Європейська Комісія створила список критичної сировини (CRM) для ЄС, який також існує в Україні. Він регулярно переглядається та оновлюється відповідно до критичного впливу конкретного компонента на економіку ЄС.

Проблема економік багатьох країн полягає у низькому рівні ресурсозбереження, через що значна частина цінних компонентів вже потрапила у хвостосховища і відвали. Обсяг породних відвалів і промислових відходів у світі перевищує сотні мільярдів тон, в яких знаходяться значні техногенні

ресурси. З іншого боку техногенні формування, що з'явилися внаслідок застосування недосконалих технологій, здійснюють негативний вплив на навколишнє середовище (повітря та підземні води). Вказані аргументи спонукають до впровадження екологічно-чистих зелених технологій видобутку, комплексного освоєння родовищ і переробки відходів у всьому світі для забезпечення здорового життя майбутніх поколінь.

Для підвищення екологічної безпеки видобувної промисловості, існуючі та майбутні фахівці мають вивчати світовий досвід та вдосконалювати інтегровані методи зменшення впливу на навколишнє середовище, до яких відносяться: зменшення споживання води та енергії, мінімізація порушення земель та утворення відходів, зменшення забруднення ґрунту, води та повітря на гірничодобувних підприємствах і своєчасна рекультивація. Видобуток критичних корисних копалин має здійснюватися комплексно з вилученням усіх цінних мінералів і роздільного складування супутніх корисних копалин, для їх повторного використання у разі потреби.

Принципи сталого розвитку гірничих регіонів мають передбачати інтеграцію економічної діяльності з екологічною цілісністю, соціальними проблемами та ефективними державними системами. Ці принципи мають усе більший вплив на розвиток екологічної та соціальної політики в останні десятиліття і були прийняті низкою міжнародних організацій, включаючи ООН та Світовий банк.

Подальший сталий розвиток гірничодобувної промисловості в Україні регламентований постановами Уряду: «Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року» (№ 3268-VI від 21 квітня 2011 р.), а також «Угодою про асоціацію між Україною та ЄС» (№ 1678-VII від 16 вересня 2014 р.).

Сталий видобуток критичної мінеральної сировини та розвиток зелених технологій видобутку в Україні передбачений стандартами у гірничодобувній промисловості (зокрема, стаття 339 Розділу V «Економічне та промислове співробітництво», Гл. 11 «Співробітництво у гірничодобувній та металургійній

промисловості», а також Гл. 6 «Довкілля» тощо). Наведені нормативні акти підкреслюють відданість України європейським цінностям, а також відповідають прагненням стати повноправним членом ЄС.

Підвищення якісних і кількісних показників надрокористування можливо здійснити шляхом підготовки нових висококваліфікованих інженерів з широким спектром навичок від сучасних ІТ і ГІС до інноваційних підходів в сфері управління мінеральними ресурсами, які будуть орієнтуватися в чинному законодавстві ЄС. Це дозволить швидко впроваджувати найкращі практики на національному рівні в галузі розробки критичної сировини. На сьогодні підготовка таких фахівців обмежується лише існуючими освітніми компонентами в межах ЗВО, які критично потребують розширення і популяризації підходів ЄС до надрокористування.

Міждисциплінарність запропонованого проєкту включає технологічні та екологічні аспекти освоєння родовищ критичної мінеральної сировини та відповідає сучасному досвіду провідних країн ЄС у цьому напрямку, створюючи якісний освітній продукт для студентів інженерних спеціальностей, що страждають від воєнних дій та території України, а також широкої громадськості.

Цільові групи проєкту це потенційні абітурієнти, студенти, викладачі та наукові співробітники, представники промисловості та роботодавці, випускники.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КРИТИЧНУ МІНЕРАЛЬНУ СИРОВИНУ

У розділі наведено загальні відомості про критичну мінеральну сировину. Ознайомившись із матеріалом здобувач має: оперуватися в термінах сфери надрокористування та чітко розрізняти критерії віднесення корисних копалин до категорій стратегічної чи критичної мінеральної сировини (КМС) в Україні; орієнтуватися в європейському законодавстві, зокрема ключових регламентах Європейського Союзу, що регулюють сталий видобуток, диверсифікацію та безпеку постачання дефіцитних ресурсів; ідентифікувати критичні технології сучасної промисловості й енергетичного переходу, які напряму залежать від стабільного забезпечення мінеральними компонентами; аналізувати геополітичні, економічні та логістичні ризики, які зумовлюють уразливість ланцюгів постачання КМС до європейського простору; оцінювати потенціал мінерально-сировинної бази України, визначаючи основні види вітчизняних критичних ресурсів та їхню роль у забезпеченні національної безпеки й інтеграції до глобальних ринків..

1.1. Загальні поняття

Проблема використання критичної сировини є комплексною, оскільки, з одного боку, значна потреба в ній є загрозою для сталого розвитку економіки Європи та світу, а з іншого масовий видобуток корисних копалин і валове накопичення відходів видобувної діяльності також несе екологічну загрозу для світу. Оскільки Європа є одним із найбільш екологічно орієнтованих регіонів у всьому світі, досвід накопичений в її добувному секторі є колосальним і має розповсюджуватися в світі [1].

Питання захисту навколишнього середовища викладено в Ініціативі «Зелена угода», яка містить план ЄС на найближчі 30 років щодо оптимізації впливу багатьох сфер для добробуту та здоров’я громадян і майбутніх поколінь. Промисловість не є винятком: усі ланцюжки доданої вартості, включно з гірничодобувним сектором, відіграватимуть ключову роль на шляху до кліматично нейтральної економіки замкнутого циклу в ЄС.

Одним з ключових гравців в цій ініціативі є вища освіта, оскільки люди, які мають хороші знання та комплексні навички спілкування, здатні вносити зміни на різних ланках, починаючи від виробництва до державного регулювання у своїх галузях. Поширення досвіду щодо поводження з критичною мінеральною сировиною дозволить підготувати гірничих інженерів зі знаннями, що будуть враховувати підходи ЄС та досвід України.

Раціональне поводження з критичною мінеральною сировиною відповідає рішенню Ради національної безпеки і оборони України «Про стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави», згідно з якого до стратегічних металічних руд відносяться 33 види корисних копалин.

Оскільки різні види мінеральної сировини мають різне значення для розвитку високотехнологічних галузей промисловості їх можуть розрізняти як стратегічну та критичну мінеральну сировину.

До критичної належить мінеральна сировина, яка має конкретне, специфічне застосування у промисловості (в тому числі у високотехнологічних та стратегічних галузях). Для неї на сучасному рівні розвитку технологій не існує заміни, а в її постачанні домінує один або кілька виробників. Отже ці корисні копалини є критично та економічно важливими для виробництва високотехнологічних засобів, а стабільність їх постачання характеризується високим ступенем ризику.

Стратегічна мінеральна сировина це безпосередньо та мінеральна сировина, яка має вирішальне значення для національної та економічної безпеки, забезпечення обороноздатності держави, а також для розвитку високотехнологічних галузей промисловості (зелена енергетика, мікроелектроніка, авіабудування тощо).

Стратегічні ресурси важливі для економічної безпеки держави, стабільності розвитку економіки та добробуту населення в перспективі, у той час як без критичної мінеральної сировини, за сучасного рівня технологій, неможливе функціонування високотехнологічних галузей промисловості.

Варто зазначити, що прийняття рішень щодо критичності корисних копалин кожна держава виконує індивідуально, тому їх перелік може зменшуватися або збільшуватися відповідно до потреби.

1.2. Класифікація стратегічної та критичної мінеральної сировини в Україні

Затвердження списку стратегічних корисних копалин України відбулося згідно з рішенням Ради національної безпеки і оборони України № 306/2021. Воно спрямоване на стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави.

Забезпечення національної економіки стратегічно важливою сировиною має відбуватися з обов'язковим урахуванням економічної безпеки та зміцнення обороноздатності країни.

З огляду на це Рада національної безпеки і оборони України затвердила офіційний перелік металічних руд і неметалічних корисних копалин, які є критично важливими для стабільного економічного розвитку та захисту держави (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Стратегічні металічні руди та неметалічні корисні копалини України (Рішення Ради національної безпеки і оборони України № 306/2021)

Група корисних копалин	Найменування
Металічні руди	алюмінієві; берилієві; ванадієві; вісмутові; вольфрамові; галієві; гафнієві; германієві; залізні; золота; індієві; ітрієві; літієві; магнієві; марганцеві; металів лантаноїдної групи; миш'якові; мідні; нікелеві; ніобієві; олов'яні; свинцеві; скандієві; срібла; стронцієві; сурм'яні; танталові; телурові; титанові; уранові; цезієві; цинкові; цирконієві
Неметалічні корисні копалини	барит; графіт; сіль калійна; флюорит

Рішення Ради національної безпеки і оборони України передбачає розробку ряду механізмів щодо стимулювання вітчизняного видобутку і отримання стратегічних мінеральних ресурсів.

У продовження розвитку законодавчої бази для освоєння стратегічної сировини Кабінет Міністрів України ухвалив постанову «Про затвердження переліків корисних копалин та компонентів стратегічного та критичного значення і переліків ділянок надр (родовищ корисних копалин) стратегічного та (або) критичного значення» (№ 845 від 14 липня 2025 р.) [2].

Згідно з цією постановою корисні копалини мають стратегічне та критичне значення (табл. 1.2).

Таблиця 1.2. Стратегічні та критичні компоненти та корисні копалини (Постанова Кабінету Міністрів України № 845 від 14.07.2025 р.)

Корисні копалини та компоненти стратегічного значення	Корисні копалини та компоненти критичного значення
алюмінієві руди; берилієві руди; мідні руди; нікелеві руди; ніобієві руди; стронцієві руди; танталові руди; титанові руди; уранові руди; цирконієві руди; флюорит	алюмінієві руди; берилієві руди; ванадієві руди; вісмутові руди; вольфрамові руди; галієві руди; гафнієві руди; індієві руди; рідкісноземельні руди (ітрієві; метали лантаноїдної групи); літієві руди; миш'якові (арсен) руди; мідні руди; нікелеві руди; ніобієві руди; олов'яні руди; свинцеві руди; скандій; стронцієві руди; сурм'яні (стибій) руди; танталові руди; телурові руди; титанові руди; уранові руди; цезієві руди; цинкові руди; цирконієві руди; сіль калійна; флюорит

Відповідно до табл. 1.2 на сьогодні до стратегічних корисних копалин в Україні відносять 11 позицій, у той час як до переліку критичних корисних копалин входить 28 позицій. Остання категорія є ширшою за першу, оскільки критична мінеральна сировина є важливою для сучасних технологій, переходу на зелену енергетику. Також ці корисні копалини мають забезпечувати високотехнологічні галузі, в яких існує високий ризик дефіциту або припинення постачання, а також відсутні замінники (суміші чи аналоги). Однак розробка критичних корисних копалин не гарантує отримання економічного прибутку, через складність процесів збагачення і мінімальні концентрації мінералів у руді.

1.3. Законодавча база для використання критичної мінеральної сировини в Європейському Союзі

Поводження з критичною сировиною (Critical Raw Materials, CRM) в ЄС регулюється комплексом стратегій, директив щодо вторинної переробки та наскрізних регламентів, який трансформувався від моніторингу до жорсткого централізованого регулювання.

Нижче наведено хронологічний перелік основних законодавчих актів та ініціатив ЄС у цій сфері, починаючи з 2015 року.

Хронологія законодавчого регулювання CRM в ЄС. У 2015 році був імплементований план дій щодо циркулярної економіки (Circular Economy Action Plan). Акт: Комунікація Єврокомісії COM (2015) 614. Суть цього акту полягає у закладанні основи для обов'язкового вилучення та повторного використання CRM особливо з відходів електроніки та акумуляторів. Дані ініціативи було започатковано для надання пріоритету впровадженню циркулярних технологій при освоєнні критичних матеріалів, з метою подальшого зниження імпортозалежності.

У 2017 році відбувся перегляд списку критичної сировини ЄС (3-й перелік). Законодавчо закріплені ініціативи у Акті: Комунікація Єврокомісії COM(2017) 490. Відповідно до змісту документа було офіційно затверджено оновлений список CRM (кількість матеріалів зросла до 27). Документ визначив нормативні орієнтири для держав-членів щодо пріоритетності фінансування видобутку та переробки цих позицій.

Наступним етапом у розвитку законодавчої бази у 2018 р. був запроваджений пакет законодавства про відходи (Waste Legislative Package). Акт: Директиви (ЄС) 2018/849, 2018/850, 2018/851 (внесення змін до базової Директиви про відходи 2008/98/ЕС та Директиви про відходи електричного й електронного обладнання – WEEE). Відповідно до нього були запроваджені більш суворі вимоги до утилізації гаджетів та промислового обладнання, що містять CRM, з метою стимулювання їхнього збору та рециклінгу всередині ЄС.

Наступним законодавчим кроком в ЄС у 2020 р. стала розробка та впровадження Плану дій щодо критичної сировини та Нова промислова стратегія. Вона міститься у Акті: Комунікація Єврокомісії COM(2020) 474 «Стійкість критично важливої сировини: прокладання шляху до більшої безпеки та сталого розвитку». Суть даних законодавчих ініціатив полягає у затверджені 4-го переліку CRM. Їх кількість збільшилася з 27 до 30 матеріалів. Акт визначив заходи з диверсифікації постачання, розвитку внутрішнього видобутку та усунення регуляторних бар'єрів. Також в цей період було створено Європейський альянс сировини (ERMA).

У 2023 році впроваджено регламент про батареї та акумулятори (EU Batteries Regulation). Акт: Регламент (ЄС) 2023/1542. Це є перший закон, який увів обов'язкові мінімальні рівні відновлення CRM (літію, кобальту, нікелю) з відходів, а також цільові показники використання відновлених матеріалів у нових акумуляторах. Одним з нововведень є «цифровий паспорт батареї» для відстеження сировини [3].

Офіційний Закон про критичну сировину (Critical Raw Materials Act – CRMA) [4] запроваджено в ЄС у 2024 році. Акт: Регламент (ЄС) 2024/1252 (травень 2024 р.). Суть: Основний фундаментальний закон, який регулює галузі освоєння критичної мінеральної сировини. Відповідно до нього, кількість критичних мінералів збільшується до 34, а стратегічних до 17 (табл. 1.3). Закон встановив чіткі індикатори самозабезпечення ЄС до 2030 року, при цьому він передбачає обов'язкові умови:

– щонайменше 10% від потреби ЄС у стратегічній сировині має видобуватися всередині блоку;

– щонайменше 40% має перероблятися та збагачуватися в ЄС;

– щонайменше 25% має забезпечуватися шляхом внутрішньої переробки відходів (рециклінгу);

- не більше 65% будь-якого стратегічного матеріалу може постачатися з однієї третьої країни, що суттєво знизить ризики політичного тиску через стабільність функціонування високотехнологічних галузей економіки.

Таблиця 1.3. Стратегічні та критичні компоненти та корисні копалини (Critical Raw Materials Act – CRMA, Регламент (ЄС) 2024/1252, 2024) [5]

Корисні копалини та компоненти стратегічного значення	Корисні копалини та компоненти критичного значення
бор; важкі рідкісноземельні елементи; вісмут; вольфрам; галій; германій; кобальт; легкі важкі рідкісноземельні елементи; літій; магній; марганець; металевий кремній; металевий титан; мідь; нікель; природний графіт	алюміній/боксит; барит; берилій; бор/борат; ванадій; важкі рідкісноземельні елементи; вісмут; вольфрам; галій; гафній; германій; гелій; кобальт; коксівне вугілля; легкі рідкісноземельні елементи; літій; магній; марганець; метали платинової групи; металевий кремній; металевий титан; мідь; миш'як (арсен); нікель; ніобій; польовий шпат; природний графіт; скандій; сурма; стронцій; тантал; флюорит (плавиковий шпат); фосфатна порода; фосфор

Розташування критичної і стратегічної мінеральної сировини в періодичній таблиці хімічних елементів [6], наведено на рис. 1.1.

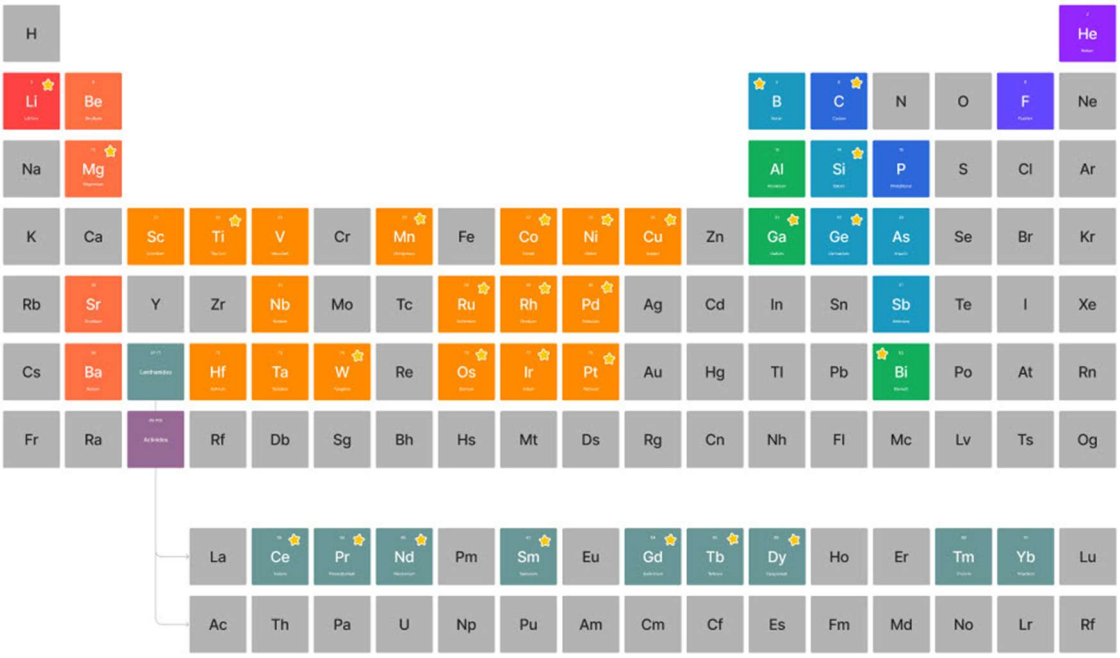


Рисунок 1.1. - Стратегічні та критичні компоненти відповідно до Закону ЄС про критичну мінеральну сировину [6] (критична сировина, позначена кольором): ★ – стратегічна сировина; ■ – перехідні метали ; ■ – метали; ■ – галогени; ■ – лужні метали; ■ – металоїди ■ – лантаноїди; ■ – лужноземельні метали; ■ – неметали; ■ – актиноїди; ■ – благородний газ

Останніми законодавчими ініціативами ЄС протягом 2025–2026 років розроблено план дій «RESourceEU» та оновлено CRMA. Стратегічний пакет ініціатив Єврокомісії COM(2025) 945 (грудень 2025 р.) та проєкт змін до Регламенту 2024/1252. Через зростання геополітичного загострення та посилення експортних обмежень Китаю, ЄС вдосконалив правила поводження з CRM. З травня 2026 року запрацював механізм IMERA (Internal Market Emergency and Resilience Act), що дозволяє Єврокомісії координувати створення стратегічних запасів CRM держав-членів і здійснювати спільні закупівлі сировини. Особлива увага приділяється ланцюгам постачання для великих компаній (понад 500 працівників), на яких проводяться регулярні стрес-тести.

В результаті детального вивчення важливості і ризиків постачання кожного окремого компоненту для ключових технологій було розроблено відповідне ранжування елементів на основі даних Єврокомісії у 2020 році [7] (рис. 1.2.).

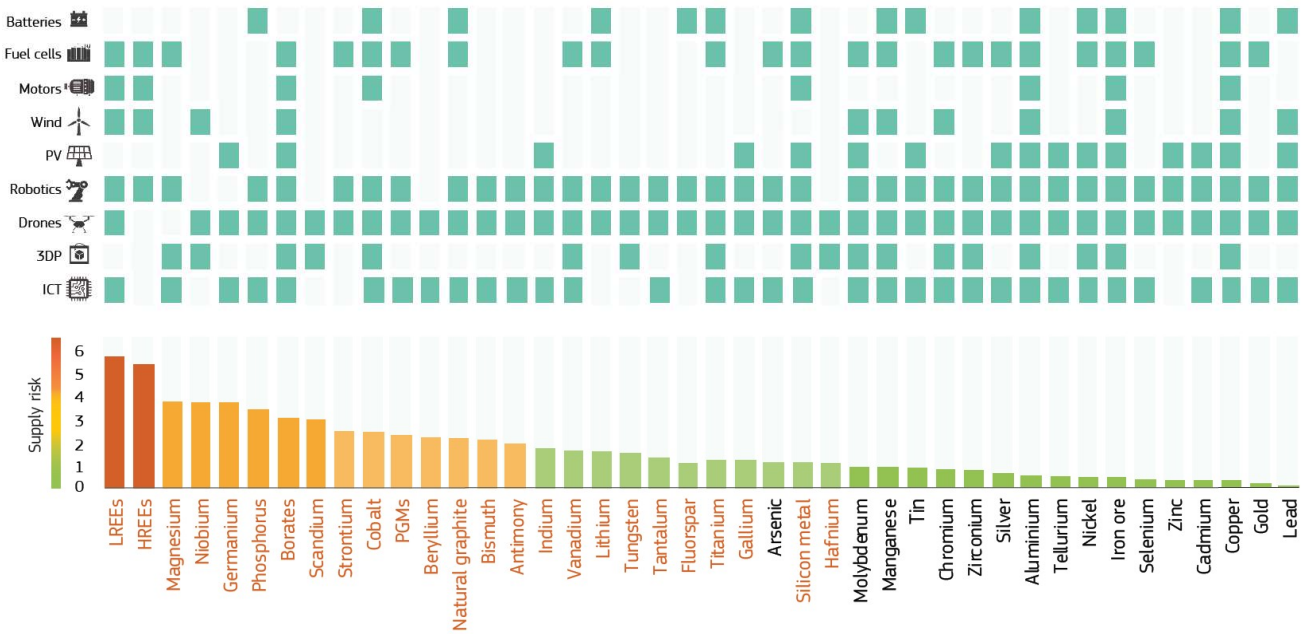


Рисунок 1.2. – Ранжування критичної мінеральної сировини (CRM) за важливістю для високотехнологічних галузей промисловості ЄС [8]

Відповідно до наведеного ранжування (рис. 1.2), основними елементами графіку є запропонована матриця технологій. На ній відображено, яка саме сировина використовується в таких технологіях, як батареї, паливні елементи, електромотори, вітряні турбіни, сонячні панелі (PV), робототехніка, дрони, 3D-друк та інформаційні технології. Згідно з графіком найвищий ризик постачання (до 6 балів) належить легким і важким рідкісноземельних елементів (LREEs і HREEs). Високий ризик (3–4 бали): магній, ніобій, германій, фосфор, борати, скандій. Середній та низький ризик: стронцій, кобальт, метали платинової групи, берилій, природний графіт, вісмут та сурма (стибій).

1.4. Критичні технології для розвитку суспільства та промисловості

Згідно з офіційним звітом Європейської Комісії [1], існує 9 важливих технологій, які потребують залучення критичной мінеральної сировини. До них відносяться технології літій-іонних акумуляторів, паливних елементів, вітроенергетики, тягових двигунів, сонячної фотовольтаїки, робототехніки, безпілотних літальних апаратів, 3D-друку (адитивне виробництво) та IT.

Літій-іонні акумулятори, паливні елементи та тягові електродвигуни становлять основу екологічно чистого транспорту та сучасних накопичувачів енергії. Вітроенергетика та сонячна фотовольтаїка виступають головними драйверами глобальної декарбонізації та трансформації енергетичного сектора, включаючи його космічні програми. Розвиток робототехніки та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) суттєво змінює виробничі процеси, як у цивільній так і в оборонній сферах. 3D-друк (адитивне виробництво) замінює традиційні фабричні методи при виготовленні деталей та механізмів, а також у аерокосмічній галузі, повністю перебудовуючи структуру та обсяги споживання сировини.

Всі ці напрямки спираються на наскрізні цифрові технології, які забезпечують функціонування та інтеграцію високотехнологічної інфраструктури між собою.

Технологія літій-іонних акумуляторів (рис. 1.2) швидко впроваджується як для електронної мобільності, так і для зберігання енергії для періодичного виробництва електроенергії. Технологія стає все більш актуальною для оборонних застосувань, оскільки дозволяє підвищувати мобільність та автономність різноманітних пристроїв.



Рисунок 1.2. – Графічне позначення акумуляторних технологій [1]

Другою технологією є паливні елементи (FC), які критично важливі при перетворення енергії, і розкриває перспективи подальшого використання водню, як палива майбутнього. Розвиток цієї технології має забезпечити високий потенціал для декарбонізації енергетичної системи та електронної мобільності в майбутньому, хоча через економічні складності широкомасштабне впровадження цих рішень ще не відбулося (рис. 1.3).

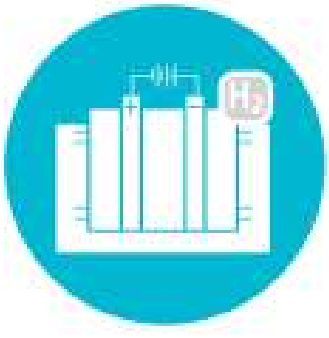


Рисунок 1.2. – Графічне позначення технології паливних елементів [1]

Третьою технологією є вітроелектрогенерація (вітроенергетика). Енергія вітру вже є однією з найбільш рентабельних технологій відновлюваної енергії на

сьогодні в ЄС. Тому для пом'якшення зміни клімату її використання залишатиметься в пріоритеті зі зростаючим впровадженням у сектори промислової бази ЄС (рис. 1.3).

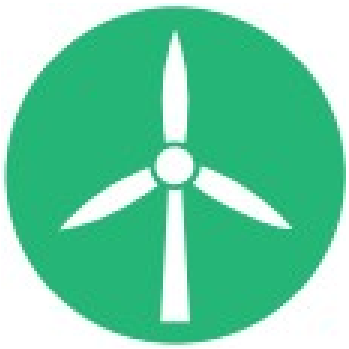


Рисунок 1.3. – Графічне позначення технологій вітроенергетики [1]

Четверта технологія включає в себе електричні тягові двигуни, які є центральними компонентами електромобілів та інших мобільних пересувних пристроїв. Постійні магнітні двигуни, що містять рідкісноземельні елементи, особливо ефективні та привабливі для поточної та майбутньої програм електромобільності (рис. 1.4).



Рисунок 1.4. – Графічне позначення тягових двигунів на постійних магнітах [1]

П'ята технологія передбачає отримання електроенергії з сонячних панелей. Вона має назву фотоелектрична технологія (PV), яка разом з енергією вітру на сьогодні лідирує у трансформації глобального сектору відновлювальної електроенергетики. Фотоелектричні панелі також актуальні для застосування у мобільних пристроях, обладнанні, розташованому на великих відстанях від енергосистеми, а також на пристроях у космосі (рис. 1.5).



Рисунок 1.5. – Графічне позначення фотоелектричної технології [1]

Шоста технологія включає в себе виробництво робототехніки. Ця технологія є новою відносно решти, але відіграє все більшу роль у виробництві майбутнього. Вона значною мірою змінює сталі підходи до розвитку оборонної та аерокосмічної промисловості, а також застосовується в енергетичних технологіях та автомобілебудуванні. Значною мірою вироби робототехніки також впроваджуються у медицину та сферу послуг (рис. 1.6).



Рисунок 1.6. – Графічне позначення технологій, пов’язаних з робототехнікою [1]

Сьома технологія, яка включає виробництво БПЛА (безпілотні літальні апарати) є одним із головних драйверів сучасної четвертої промислової революції (Industry 4.0). Вона кардинально змінює підходи до організації праці, оборонних технологій та екологічних засобів моніторингу. БПЛА (дрони) автоматизують небезпечні процеси, знижують витрати бізнесу та рятують людські життя. В останні роки дрони все частіше використовуються як у цивільних так і різних оборонних програмах (рис. 1.7).



Рисунок 1.7. – Графічне позначення технологій безпілотних літальних апаратів [1]

Восьма технологія включає у себе 3D-друк (адитивне виробництво). Вона швидко змінює традиційні ланцюги поставок і замінює місця де раніше виконувалося виробництво деталей і механізмів, зокрема для оборонної та аерокосмічної сфер. Це призводить до значної зміни у підходах до залучення мінеральної сировини і зміни пріоритетів при виборі необхідних видів витратних матеріалів (рис. 1.8).



Рисунок 1.8. – Графічне позначення технологій 3D-друку (адитивне виробництво) [1]

Остання дев’ята технологія включає в себе широкий спектр ІТ, оскільки зв’язок між критичною сировиною та ІТ-сектором є фундаментальним. Це пояснюється неможливістю виробництва будь-якого сучасного цифрового пристрою, гаджету, чи системи зв’язку без залучення рідкісних металів та напівпровідників. Безперебійне постачання цих матеріалів визначає технологічний суверенітет і стабільність глобальної ІТ-індустрії, а через дефіцит CRM на світовому ринку часто виникають кризові явища. ІТ підтримують

величезний цифровий сектор, забезпечуючи всі технології, в яких використовуються критичні мінерали (рис. 1.9).

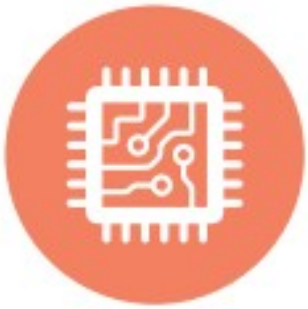


Рисунок 1.8. – Графічне позначення інформаційних технологій [1]

1.5. Ризики постачання критичної сировини в Європейський Союз

Взаємозв'язок постачання критичної мінеральної сировини з розвитком високотехнологічних галузей промисловості необхідно розглядати як залежність виробничих процесів кожної галузі від конкретного елемента. Систематизація ризиків постачання мінеральної сировини на роботу окремих технологій та галузей промисловості наведена на рис. 1.9.

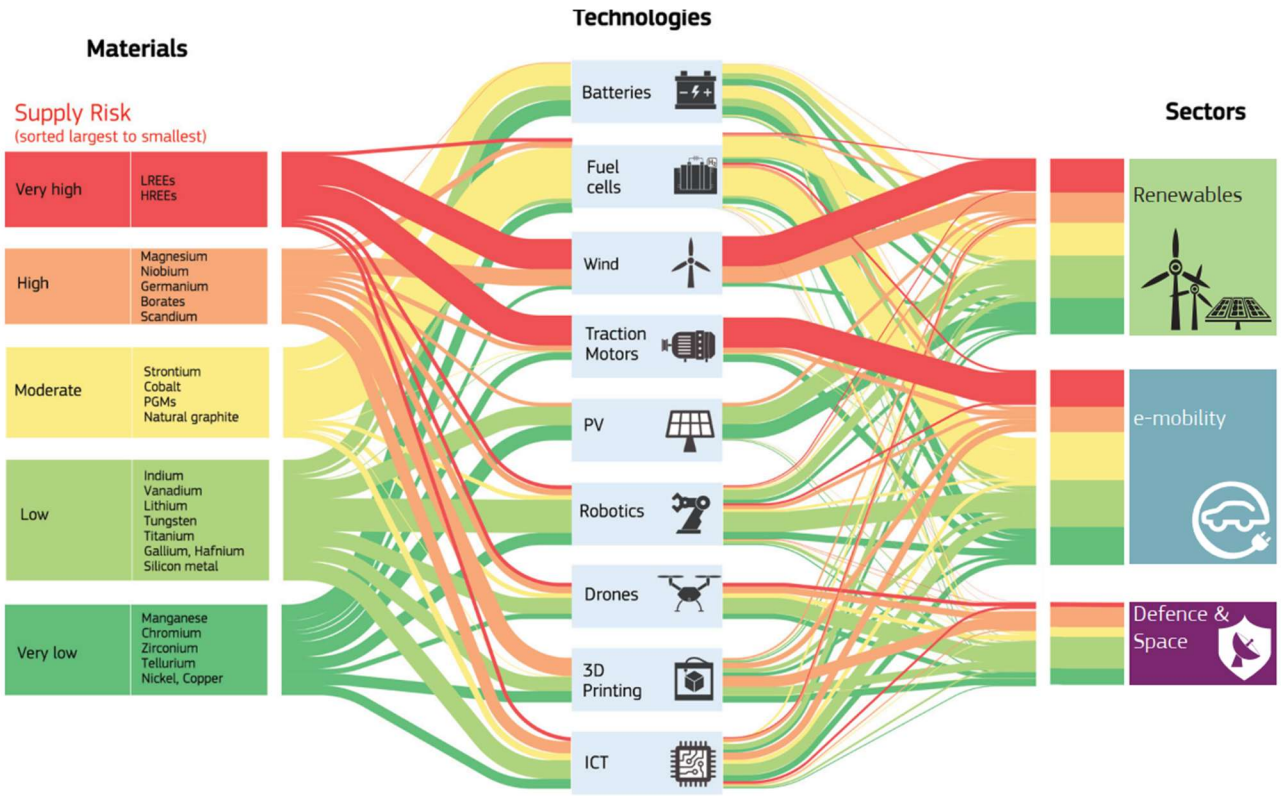


Рисунок 1.9. – Ризики постачання критичної мінеральної сировини для ключових технологій та секторів економіки [1]

Основні ризики постачання критичної мінеральної сировини на світові ринки залежать від багатьох взаємопов'язаних чинників, серед яких ключовими є географічна концентрація видобутку у Китаї та геополітичний вплив на світові ринки. Також виникнення дефіциту критичної мінеральної сировини пов'язане зі стрімким зростанням попиту на зелені технології. Сучасний стан забезпечення критичною мінеральною сировиною в світі та основні країни виробники представлені на (рис. 1.10).

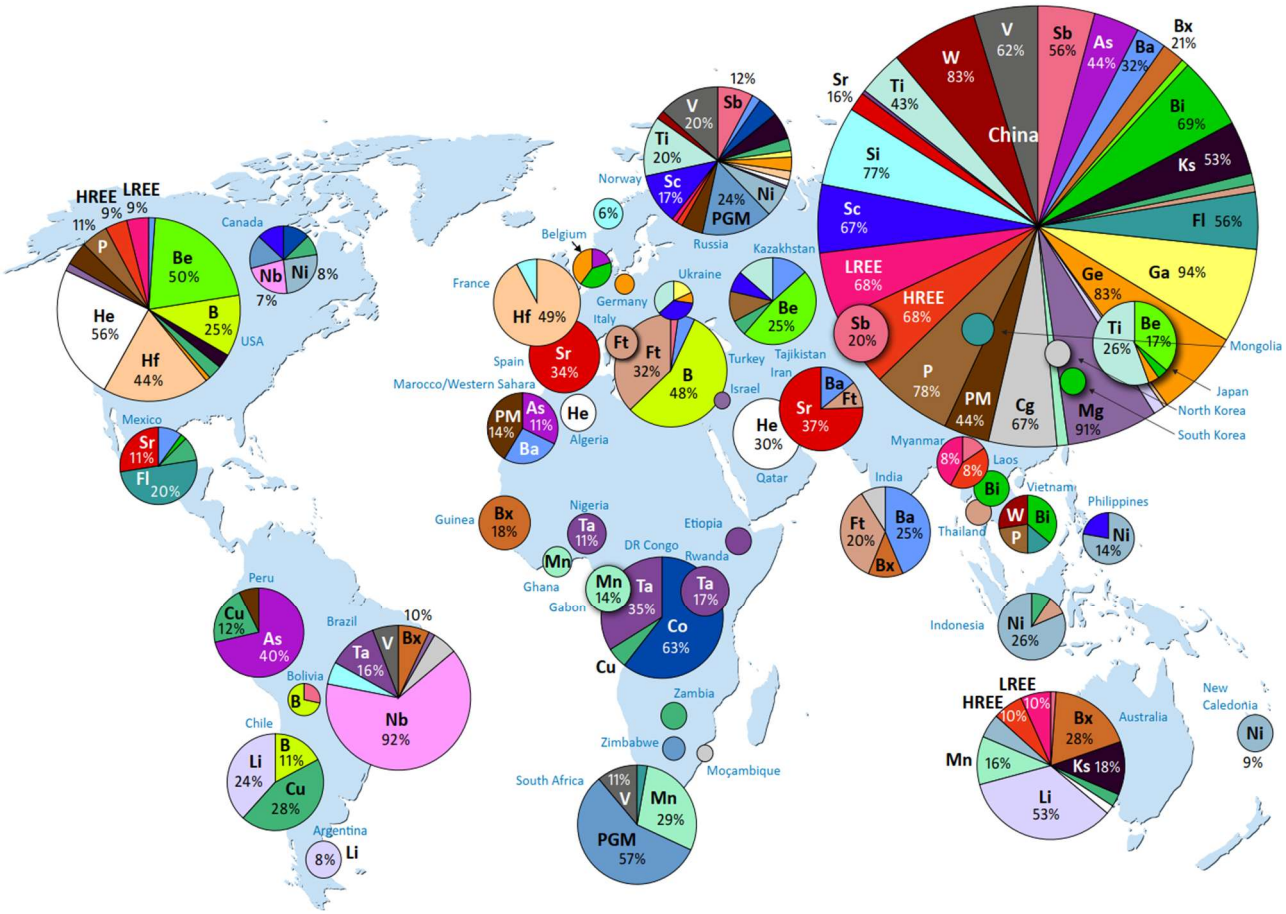


Рисунок 1.10. – Основні виробники критичної мінеральної сировини у світі в 2024 році [9] (Sources: SCREEN3/EU)

Розглянемо більш детально конкретні ризики які виникають при забезпеченні критичною мінеральною сировиною кожної з 9 розглянутих технологій. Перелік ризиків та можливі напрямки заходів щодо їх мінімізації розроблено в методичних рекомендаціях Європейської Комісії «Критично важлива сировина для стратегічних технологій і секторів у ЄС: Прогнозні дослідження» [1].

Для першої технології виробництва літій-іонних елементів основними вузькими місцями (обмежувачами) в ЄС є сировинні етапи та виробництво оскільки Китай разом з Африкою та Латинською Америкою забезпечує 74% усієї сировини для акумуляторів. У той же час сам Китай є домінантом на світовому ринку і постачає 66% готових Li-батарей. В даний час ЄС забезпечує менше 1% Li-батарей, що є критично недостатньо навіть для мінімального забезпечення внутрішнього попиту.

При аналізі основних ризиків для промисловості паливних елементів, встановлено, що їх виготовлення значною мірою покладається на каталізатори на основі металів платинової групи. Причому платина в паливних елементах становить приблизно половину від їх вартості. Одним з основних постачальників цієї сировини на світовий ринок є Південна Африка та Зімбабве. Незважаючи на високий ризик постачання, пов'язаний із усією сировиною для паливних елементів, найбільша вразливість щодо постачання в ЄС стосується етапу складання, де домінують у виробництві США з Канадою (48%), а також Японія з Південною Кореєю (51%). В даний час ЄС забезпечує менше 1% паливних елементів.

Для технології виготовлення вітрогенераторів у ланцюжку постачання критичної сировини найвищі ризики існують на етапі її отримання. За статистичними даними ЄС забезпечує лише 1% сировини для вітрової енергії. Існують серйозні занепокоєння щодо поставок рідкісноземельних елементів для виробництва постійних магнітів – ключових компонентів для генераторів вітрових турбін. Як вже було відмічено раніше Китай у їх виготовленні відіграє квазімонополістичну роль. Варто відзначити, що у виробництві обладнання для цієї технології ЄС відіграє значну роль лише на етапі складання, де його частка перевищує 50%.

Основною критичною сировиною для виготовлення тягових двигунів є рідкісноземельні елементи та борати, які потрібні для виготовлення постійних магнітів. Тому для даної технології гостре занепокоєння викликають ризики поставок, пов'язані з видобутком і переробкою рідкісноземельних матеріалів, не

дивлячись на те, що ключовим гравцем у виробництві тягових двигунів є Японія (60% ринку), Китай все більше домінує в постачанні рідкісноземельних елементів на світовий ринок. За статистичними даними Європейський Союз забезпечує лише 8% світового виробництва тягових двигунів для електромобілів (EV). Це свідчить про значну стратегічну вразливість європейської автомобільної промисловості.

При виготовленні сонячних панелей внесок ЄС є незначним на кожному етапі ланцюжка поставок. Однак різноманітний набір технологій, крім панелей на основі кремнію, призводить до великої кількості постачальників сировини, причому Китай представляє половину ринку. Роль Китаю стає квазімонополістичною на етапі компонентів, що призводить до високого ризику поставок. В загальному об'ємі виготовлення приладів для фотоелектричної технології ЄС забезпечує лише 1% фотоелектричних блоків на основі кремнію.

Технології виготовлення робототехніки вимагають залучення понад 44 видів мінеральної сировини, з яких ЄС виробляє лише 2%. Як і в попередніх випадках Китай є основним постачальником сировини для цих технологій з 52%, за ним йдуть Південна Африка (15%). Подібні потенційні вузькі місця також можуть виникнути в постачанні компонентів робототехніки. З іншого боку, ЄС є головним гравцем у виробництві оброблених матеріалів і збірок робототехніки з відповідно 21% і 41% світових поставок.

При виготовленні БПЛА ЄС значно залежить від зовнішніх постачальників сировини та компонентів, а також збірок. Для виготовлення зазначених виробів Китай постачає більше третини сировини, за ним йде Південна Африка (7 %). Понад 50 % сировини надходить із багатьох менших країн-постачальників, що відкриває можливості для диверсифікації поставок. Варто відмітити, що Китай домінує у виробництві цивільних безпілотників і все більше у секторі професійних безпілотників, у той час як США та Ізраїль домінують у виробництві військових безпілотників.

Технології 3D-друк швидко впроваджуються у різні технології виробництва деталей та інструментів, що порушує традиційні ланцюги поставок

і традиційні технології виробництва. Окрім алюмінію, магнію, нікелю та титану, найважливішою сировиною для адитивного виробництва на основі металу є кобальт, гафній, ніобій, скандій, металевий кремній, вольфрам і ванадій. Сировинний етап є головним вузьким місцем у даній технології. На сьогодні Китай забезпечує 35% сировини, тоді як ЄС забезпечує лише 9%. Однак, в обробці мінеральної сировини для адитивного виробництва ЄС покриває більше половини постачання. Для систем 3D-друку на металевій основі ЄС забезпечує 34% світових поставок.

Майже вся періодична система елементів знаходиться в цифрових технологіях, зокрема, висока частка споживання таких елементів, як мідь, галій, германій, золото, індій, платинова група, рідкісноземельні елементи і тантал. Китай (41%) і країни Африки (30%) є домінуючими постачальниками в світі для інформаційних технологій. Європа в значній мірі залежить від інших країн (переважно від Південно-Східної Азії) при отриманні високотехнологічних компонентів і збірки.

Відповідно до наявних потреб у критичній сировині і можливості їх задоволення, ЄС необхідно розвивати власне виробництво у чотирьох критично важливих сферах, щоб зменшити залежність від глобальних ринків та зберегти технологічний суверенітет. В першу чергу справа стосується виготовлення літій-іонних батарей. Необхідно інвестувати у видобуток сировини, її переробку та збирання, щоб подолати залежність від Азії. Для підвищення стійкості промисловості з виготовлення сонячних електростанцій необхідно поступово збільшувати їх внутрішнє виробництво, яке зараз є найслабшою ланкою ланцюга постачань. При виготовленні тягових двигунів ЄС має критичну залежність від імпорту рідкісноземельних магнітів з Китаю (близько 98%). Необхідно терміново створювати власні лінії виробництва електродвигунів та інвестувати у технології з вторинного перероблення сировини. Також варто зазначити низьку залученість ЄС у виробництво цифрових технології, тому важливо забезпечити доступ до критичної сировини та відновити виробництво ключових компонентів і мікросхем всередині союзу (рис. 1.11).



Рисунок 1.11. – Частка участі ЄС у видобутку сировини та її переробці, а також виготовлені компонентів та збірки готової продукції [1]

1.6. Основні види критичної мінеральної сировини в Україні

Відповідно до інформаційного матеріалу Державної геологічної служби України, на сьогодні є дев’ять видів критичної мінеральної сировини, яка має балансові запаси [10]. До них відноситься: літій, титан, нікель, кобальт, берилій, тантал, ніобій, графіт та скандій (рис. 1.12). Цей список не є вичерпним, але для підтвердження доцільності розробки нових критичних мінералів потребується проведення додаткових геологорозвідувальних робіт для подальшої оцінки ресурсів за міжнародними стандартами.

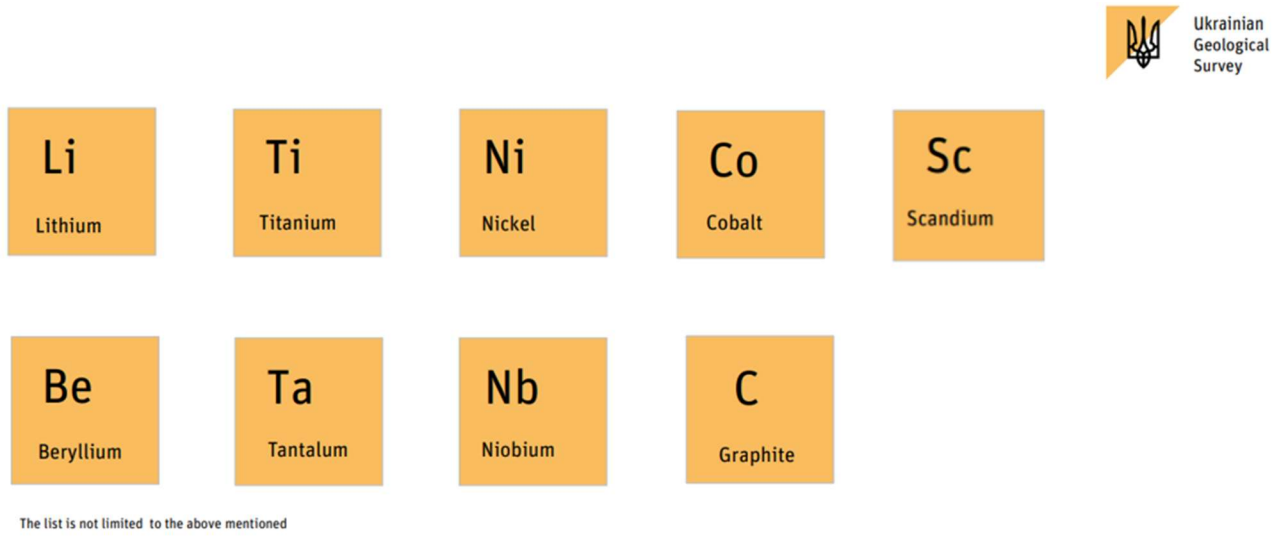


Рисунок 1.12. – Перелік реальної та перспективної критичної мінеральної сировини України зі встановленими балансовими запасами, [10]

Аналіз відкритих джерел інформації дозволяє стверджувати, що Україна має найбільші запаси титанових руд у Європі (близько 8,4 млн тонн). Попри скорочення видобутку на 68% у період 2021–2024 років через воєнні виклики, країна залишається провідним європейським постачальником ільменітового концентрату. Головні місця видобутку це Іршанський та Вільногірський ГЗК, а також компанія Velta.

Також Україна має значні запаси графіту. Поклади природного графіту в Україні є одними з найбільших у Європі (до 17,9 млн тонн). Проте поточний видобуток сировини є мінімальним і покриває лише незначну частку світового ринку. Промислова розробка ведеться переважно на Заваллівському родовищі. У 2024 році було видобуто близько 1200 тонн графіту, при цьому експорт перевищив 2800 тонн, що пов’язано з активним використанням раніше накопичених запасів на підприємстві.

Найбільш перспективним критичними ресурсами, що не розробляються в Україні варто вважати поклади літію. Попри підтверджені запаси близько 500 000 тонн (біля 3% світових), промисловий видобуток літію в Україні наразі не ведеться. Розробка потребує значних капіталовкладень, а частина родовищ знаходиться близько до зони бойових дій.

Берилій, Тантал, Ніобій – ці критичні метали зафіксовані у великих комплексних родовищах (наприклад, Пержанське родовище берилію та Мазурівське для танталу й ніобію). Офіційний масштабний видобуток наразі призупинено або не розпочато через брак закордонних технологій та інвестицій.

Розробка нікелю та кобальту, що зосереджені на Побужжі, майже не виконується, а місцевий феронікелевий комбінат тривалий час працює переважно на імпортній сировині.

Скандій на сьогодні промислово не видобувається як окремий елемент, попри наявність підтверджених запасів. Наразі країна володіє значним геологічним потенціалом, проте розробка родовищ перебуває переважно на стадії дослідження, залучення інвестицій та підготовки.

Контрольні запитання

1. У чому полягає принципова різниця між поняттями «стратегічна мінеральна сировина» та «критична мінеральна сировина» (КМС)?

2. Які нормативно-правові акти та критерії визначають класифікацію стратегічних і критичних корисних копалин в Україні?

3. Яку роль відіграє Закон ЄС про критичну сировину (*Critical Raw Materials Act*) у регулюванні та забезпеченні ресурсної безпеки європейського простору?

4. Для яких саме критичних технологій сучасної промисловості та «зеленого» переходу мінеральна сировина є незамінним компонентом?

5. Які головні геополітичні та економічні ризики зумовлюють високу вразливість ланцюгів постачання КМС до країн Європейського Союзу?

6. Які види критичної мінеральної сировини в Україні мають найбільший потенціал для інтеграції у європейські виробничі ланцюги доданої вартості?

7. Як саме мінерально-сировинна база України може вплинути на зниження ризиків постачання КМС для європейської промисловості в умовах глобального енергетичного переходу?

Список рекомендованої літератури до розділу 1

1. European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020.

2. Кабмін затвердив переліки критичних і стратегічних корисних копалин та ділянок надр (родовищ) для проведення конкурсів УРП і аукціонів. Джерело: https://www.geo.gov.ua/kabmin-zatverdyv-pereliky-krytychnykh-i-stratehichnykh-korysnykh-kopalyn-ta-dilianok-nadr-rodovyshch-dlia-provedennia-konkursiv-urp-i-auktsioniv/?doing_wp_cron=1790672316.5489280223846435546875

3. Регламент Європейського Союзу про батареї та акумулятори (EU Battery Regulation 2023/1542).

4. Critical Raw Materials Act. Регламент Європейського Парламенту та Ради ЄС 2024/1252 від 11 квітня 2024 року. Джерело: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R1252

5. Critical and strategic raw materials. Джерело: https://www.sgu.se/en/mineral-resources/critical-raw-materials/

6. European Critical Raw Materials Act. Джерело: https://mobilitynotes.com/articles/european-critical-raw-materials-act

7. RMIS – Raw Materials Information System. Джерело: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials

8. Mori, M., Stropnik, R., Sekavčnik, M., & Lotrič, A. (2021). Criticality and life-cycle assessment of materials used in fuel-cell and hydrogen technologies. Sustainability, 13(6), 3565. https://doi.org/10.3390/su13063565?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle.

9. Global production of critical and strategic raw materials - World map 2023 ENG. Джерело: https://www.sgu.se/globalassets/mineralnaring/kritiska-material/global-production-of-critical-and-strategic-raw-materials---world-map-2023-eng.pdf

10. Державна служба геології та надр України: Інвестиційний атлас надрокористувача: https://www.geo.gov.ua/

РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ КРИТИЧНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ У ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЛУЗЯХ ЕКОНОМІКИ

Під час вивчення матеріалів другого розділу здобувач має опанувати такий обсяг теоретичних знань щодо застосування КМС у високотехнологічних галузях економіки. Розуміти фізико-хімічну роль КМС у функціонуванні компонентів відновлюваної енергетики, зокрема сонячних електростанцій, вітрогенераторів та паливних елементів. Знати специфіку елементного складу новітніх літій-іонних акумуляторів і тягових двигунів, які є технологічною основою сучасного екологічного транспорту. Чітко усвідомлювати залежність галузей робототехніки, безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та цифрових технологій від безперебійного постачання рідкісноземельних та рідкісних металів. Засвоїти принципи застосування критичних мінеральних компонентів і металевих порошків в адитивних технологіях (3D-друці) та новітньому промисловому виробництві..

2.1. Критична мінеральна сировина у новітніх технологіях

Відповідно до результатів проведених досліджень (зокрема Єврокомісії) було визначено основні ризики постачання критичної сировини для розглянутих раніше технологій: акумулятори, вітрогенератори, фотовольтаїка, БПЛА тощо, які в першу чергу пов’язані з геополітичними викликами [1].

Основні ризики для Європейського Союзу можна поділити на кілька ключових напрямів це географічна концентрація виробництва кричної сировині в обмеженій кількості країн та стрімкий стрибок попиту на зелені технології в усьому світі. На сьогодні ЄС майже повністю залежить від імпорту багатьох мінералів, а його частка у світовому видобутку зазвичай не перевищує 7%, до того ж постачання основних обсягів сировини відбувається з країн з неринковою економікою. Китай є абсолютним монополістом у постачанні РЗЕ, контролює рафінування літію, кобальту та графіту для Li-ion акумуляторів.

Також суттєвим ризиком для ЄС [2] є вразливість ланцюгів переробки оскільки окрім фізичної відсутності копалин у надрах, відсутні достатні потужності для їх промислової переробки (рис. 2.1).



Рисунок 2.1. – Застосування окремих видів критичної мінеральної сировини у високотехнологічних галузях промисловості [2]

Тобто навіть наявність постачальників сировини з Африки або Південної Америки не дозволяє ЄС виступати самостійним гравцем, оскільки її первинне очищення та перетворення на високотехнологічні компоненти найчастіше відбувається у Китаї. Якщо ці поставки блокуються через політичні мотиви, європейські заводи залишаються без сировини необхідної якості.

Ризики виробництва для технологічних виробників ЄС посилюються через прогнозований різкий стрибок попиту до 2030 та 2050 років, який пов'язаний з переходом на зелену енергетику та цифровізацію. Зростання дефіциту через різке споживання високотехнологічної продукції змушує розвивати власні потужності у виготовленні критичних матеріалів. Наприклад, за прогнозами, попит ЄС лише на рідкісноземельні елементи до 2030 року зросте у 5 разів. У свою чергу глобальна пропозиція матеріалів фізично не встигає за політичними цілями ЄС щодо декарбонізації, що створює хронічний дефіцит та цінову нестабільність.

Для загального розуміння важливості критичної сировини у високотехнологічних галузях промисловості необхідно проаналізувати її унікальні властивості та неможливість заміни за сучасного розвитку техніки і технологій.

Критична мінеральна сировина використовується у вузлах техніки, де потрібні екстремальні фізико-хімічні властивості: надпотужний магнетизм, стійкість до величезних температур, висока електропровідність або здатність накопичувати великі обсяги енергії. Замінити ці елементи іншими без втрати ефективності приладу і його типорозмірів найчастіше технічно неможливо.

Розглянемо ключові вузли сучасної техніки та електроніки, де використовується критична мінеральна сировина. Основна увага буде приділена технологіям створення літій-іонних акумуляторів, виготовлення паливних елементів, генерації зеленої енергетики, тягових двигунів, безпілотних літальних апаратів, а також робототехніки та адитивного виробництва. Також будуть розглянуті питання використання критичної сировини при виробництві устаткування для інформаційних технологій.

2.2. Удосконалена (літій-іонна) технологія акумулятора

Використання критичної мінеральної сировини при виготовленні літій-іонних акумуляторних батарей показано на рис. 2.2.

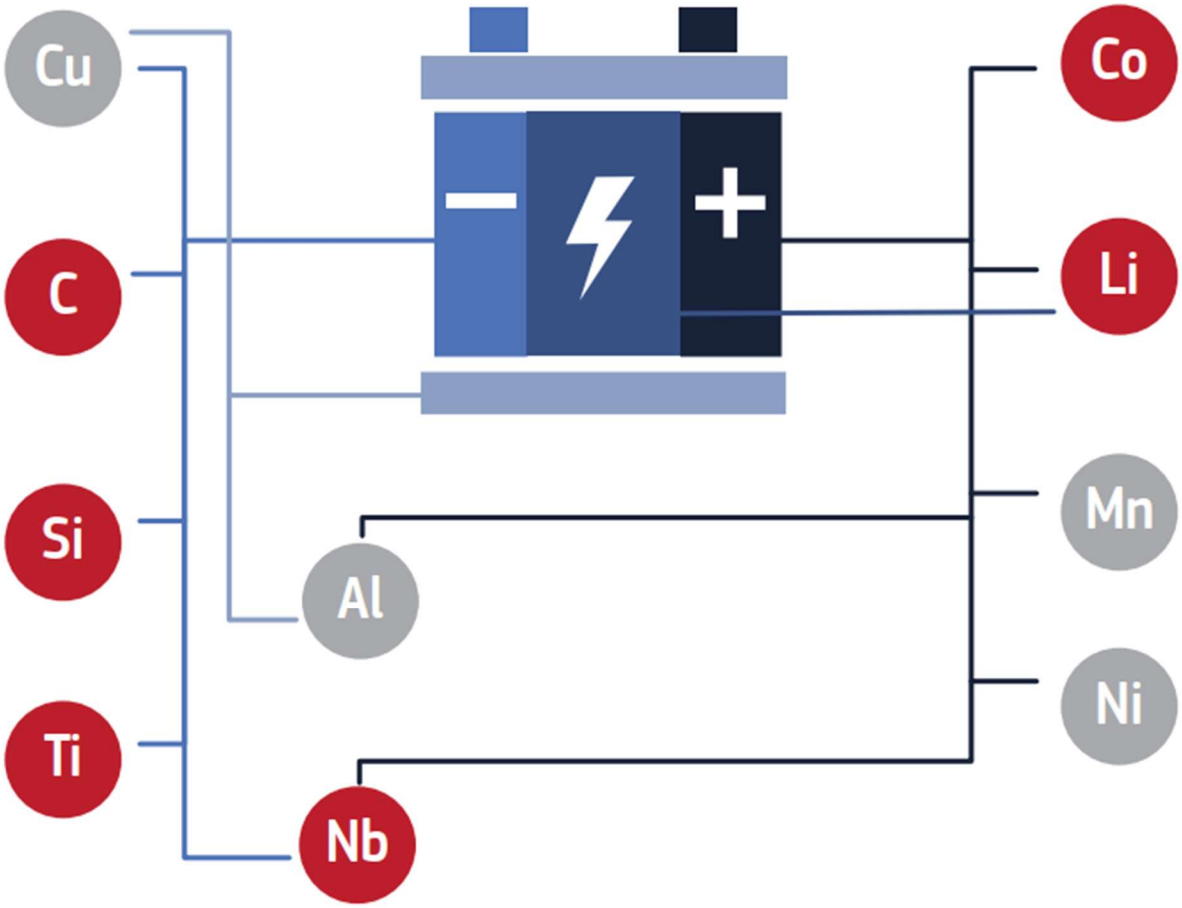


Рисунок 2.1. – Критична мінеральна сировина, що задіяна в технологіях виготовлення літій-іонних акумуляторів [2]

Для встановлення важливості кожного із наведених критичних матеріалів при виготовленні акумуляторних батарей, розглянемо їх основні призначення у даних виробах:

- Мідь: як струмоприймаюча фольга на стороні анода, в проводах та інших струмопровідних частинах.
- Графіт: природний або синтетичний високочистий анодний електрод у всіх типах літій-іонних акумуляторів.
- Кремній: у (майбутніх) анодах для підвищення щільності енергії.

- Титан: у майбутніх анодних матеріалах і покриттях, для упаковки акумуляторів.
- Алюміній: для упаковки акумуляторів або як фольга струмоприймача (катод) в батареях NCA (оксид літію-нікелю-кобальту-алюмінію).
- Ніобій: у майбутніх анодних і катодних матеріалах (покриттях) для підвищення стабільності та щільності енергії.
- Кобальт: у матеріалах катода в батареях LCO (оксид літію-кобальту), NCA та NMC (оксид літію-нікелю-марганцю-кобальту).
- Літій: як літій-кобальтовий оксид (катод) і як сіль (електроліт) у літій-іонних акумуляторах.
- Марганець: у катодних матеріалах для батарей NMC та LCO.
- Нікель: як гідроксид або інтерметалічні сполуки в батареях NMC, NCA.

Аналіз ризиків виготовлення літій-іонних акумуляторів, які пов'язані із забезпеченням промисловості ЄС критичною мінеральною сировиною наведено на рис. 2.3.

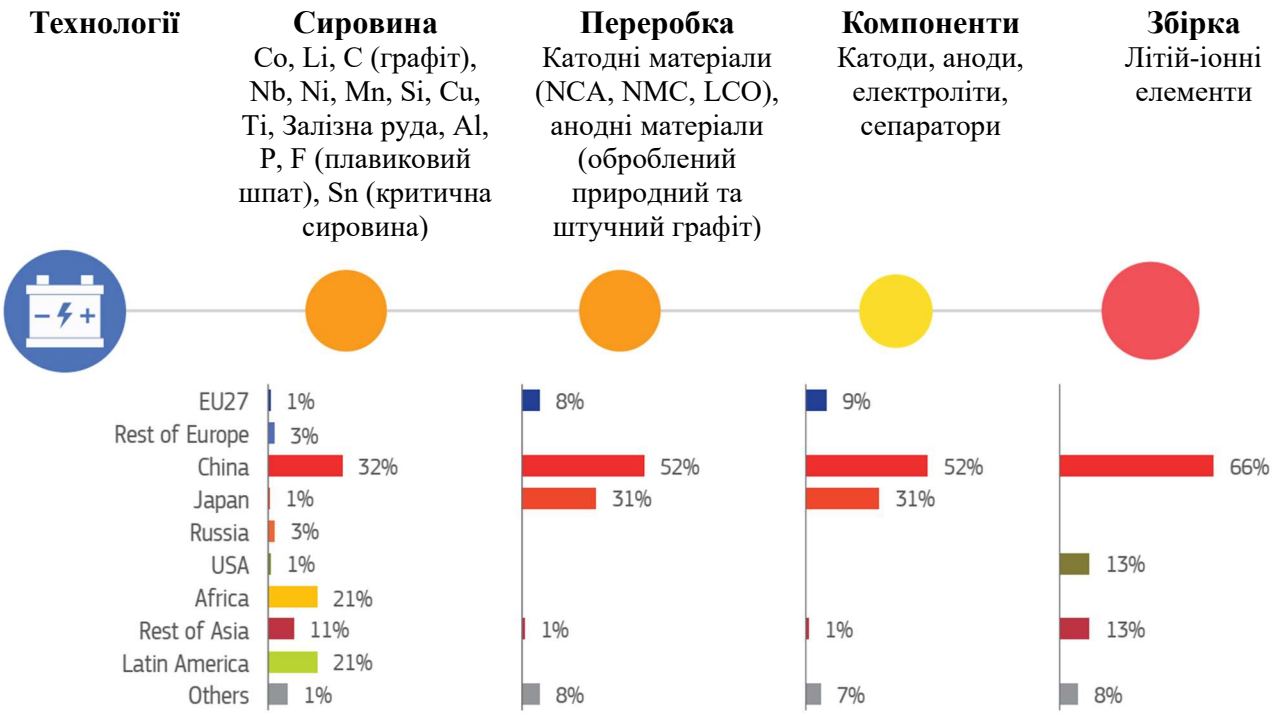


Рисунок 2.3. – Частка країн світу в різних технологічних процесах при виготовленні літій-іонних акумуляторів [2]

Суттєвий попит на літій-іонні акумулятори продовжує зростати, оскільки за прогнозами експертів споживання літій-іонних акумуляторів в найближчі десятиріччя продовжить збільшуватися. При цьому основне призначення літій-іонних акумуляторів до 2050 буде пров'язано з виготовленням гібридних і повністю електричних автомобілів. Розвиток цього ринку спрогнозовано за трьома сценаріями, в залежності від зростання попиту на електромобілі (рис. 2.4).

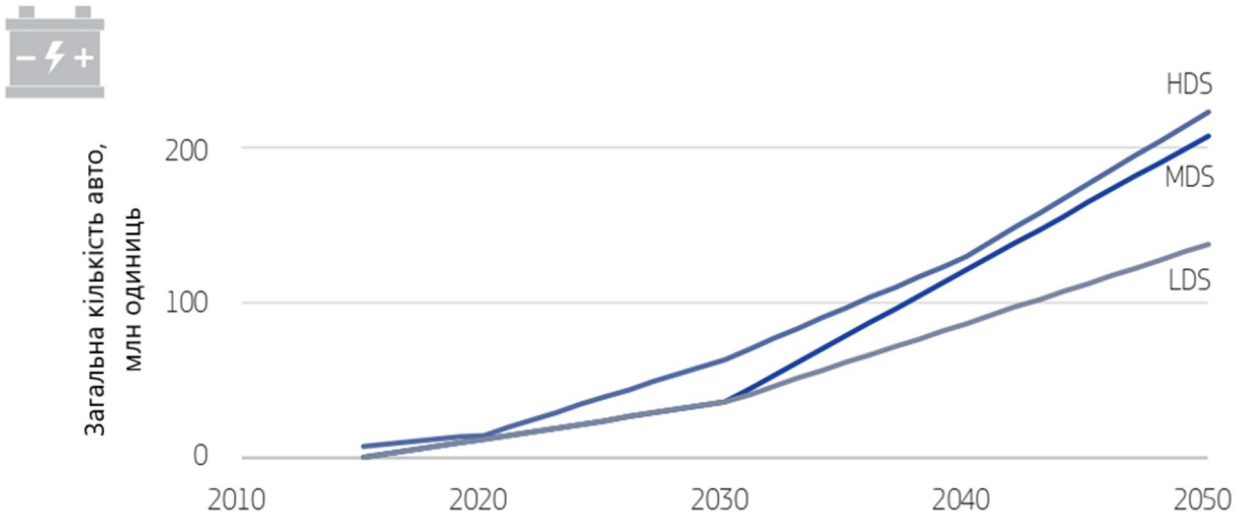


Рисунок 2.4. – Прогноз зростання загального автопарку гібридних і повністю електричних автомобілів в ЄС до 2050 р. [2]: LDC – сценарій низького попиту; MDS – сценарій середнього попиту; HDS – сценарій високого попиту

Другим фактором, що впливає на зростання попиту на літій-іонні акумулятори є виготовлення батарей для зберігання енергії для приватного та комерційного сектору. Відповідно до прогнозів експертів в подальшому технології накопичення енергії набуватимуть більшої популярності, особливо в умовах зростаючого встановлення сонячних панелей та вітрогенераторів, а також необхідності зберігати і розподіляти електроенергію у денний та нічний час. Передбачається, що до 2050 року загальний об'єм накопичувачів енергії, які будуть використовуватися в ЄС сягатиме 800 Гігават-годин (рис. 2.5).

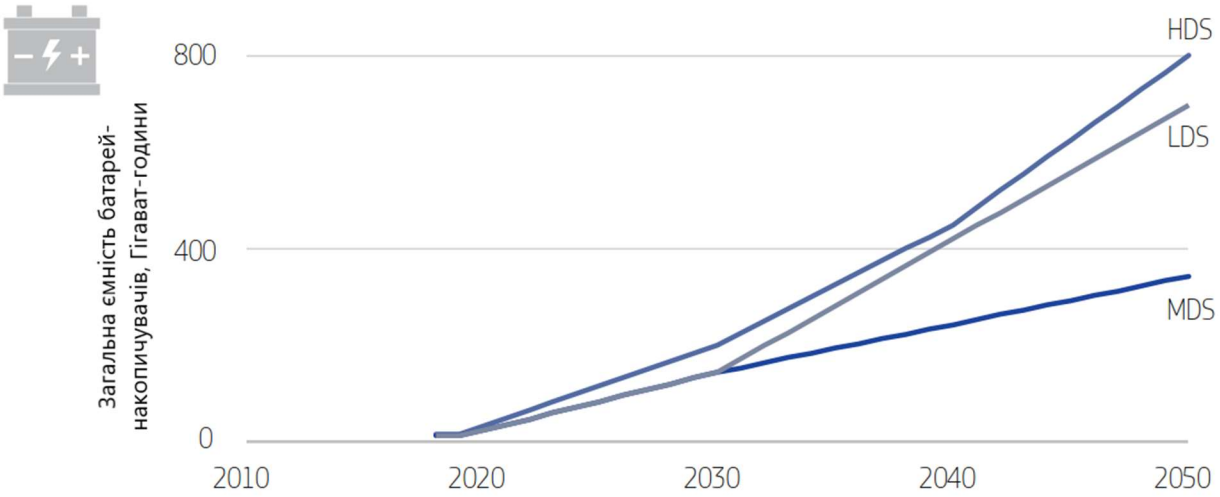


Рисунок 2.5. – Прогноз зростання загального об’єму літій-іонних батарей накопичувачів енергії у приватному і комерційному секторах в ЄС до 2050 року [2]

Для задоволення потреб внутрішнього ринку ЄС технологіями, які використовують літій-іонні акумулятори, Європейською Комісією розроблено перелік рекомендацій щодо залучення критичних мінералів для виготовлення батарей [2].

В першу чергу рекомендується диверсифікувати поставки критичної сировини. Необхідно розширювати торгівельні угоди з третіми країнами та використовувати економічну дипломатію щодо кобальту, літію, природного графіту та нікелю класу I, щоб зменшити ризики поставок.

Наступним кроком є покращення виробничих можливостей у ЄС. Необхідно збільшувати видобуток та переробку в ЄС ключової сировини та оброблених матеріалів (див. рис. 2.3). Важливо створити привабливий інвестиційний клімат, а також спеціальні екосистеми для виробництва акумуляторів, де є можливість об’єднувати компанії з різним досвідом у ланцюжку створення вартості. Одночасно варто спрямувати зусилля на залучення іноземних інвестицій компаній з виробництва електроніки, автомобілів і акумуляторів для підтримки вищих екологічних та соціальних стандартів порівняно з діяльністю в інших країнах світу.

Варто спрямувати зусилля на переробки та повторне використання критичної сировини, що міститься у літій-іонних акумуляторах. Ця діяльність дозволить відновлювати такі ключові матеріали, як кобальт, літій, марганець і нікель, з метою їх повторного використання при виробництві нових батарей різного призначення.

Розширення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт в галузі повторного освоєння критичної сировини літій-іонних акумуляторів дозволить визначити економічні механізми, що забезпечують покращення соціальних та екологічних стандартів. Це дозволить підвищити конкурентоспроможність європейських компаній в світі. Рекомендуються конкретні інвестиції в науково-дослідні роботи та, зокрема, у матеріалознавство, гірничо-геологічний напрям та металургійні дослідження, пов’язані з акумуляторами.

Необхідно сприяти міжнародному співробітництву та стандартизації літій-іонних акумуляторів. Вимоги екодизайну є важливими для підвищення рівня повторного використання і переробки, включаючи збільшення використання переробленого вмісту в нових продуктах, що дозволить частково задовольнити попит на нові вироби та зменшити вплив на навколишнє середовище.

2.3. Паливні елементи

Перспективи розвитку технології паливних елементів разом із воднем стануть привабливим рішенням для створення чистих, сталих і безпечних енергетичних систем. Перевагою технології є поєднання можливостей електроенергії та водню у спільних установках. Як електрохімічні пристрої, вони перетворюють паливо безпосередньо на електрику без процесу горіння, де внаслідок реакції водню з киснем утворюється вода та вивільняються електрони [2].

Наразі найпопулярнішим типом цієї технології є паливні елементи з полімерною електролітною мембраною (PEM FC). Вони відзначаються високою ефективністю перетворення енергії, зменшують забруднення повітря та здатні працювати на відновлюваних ресурсах.

Основне призначення критичної мінеральної сировини при виготовленні паливних елементів наведено на рис. 2.6.

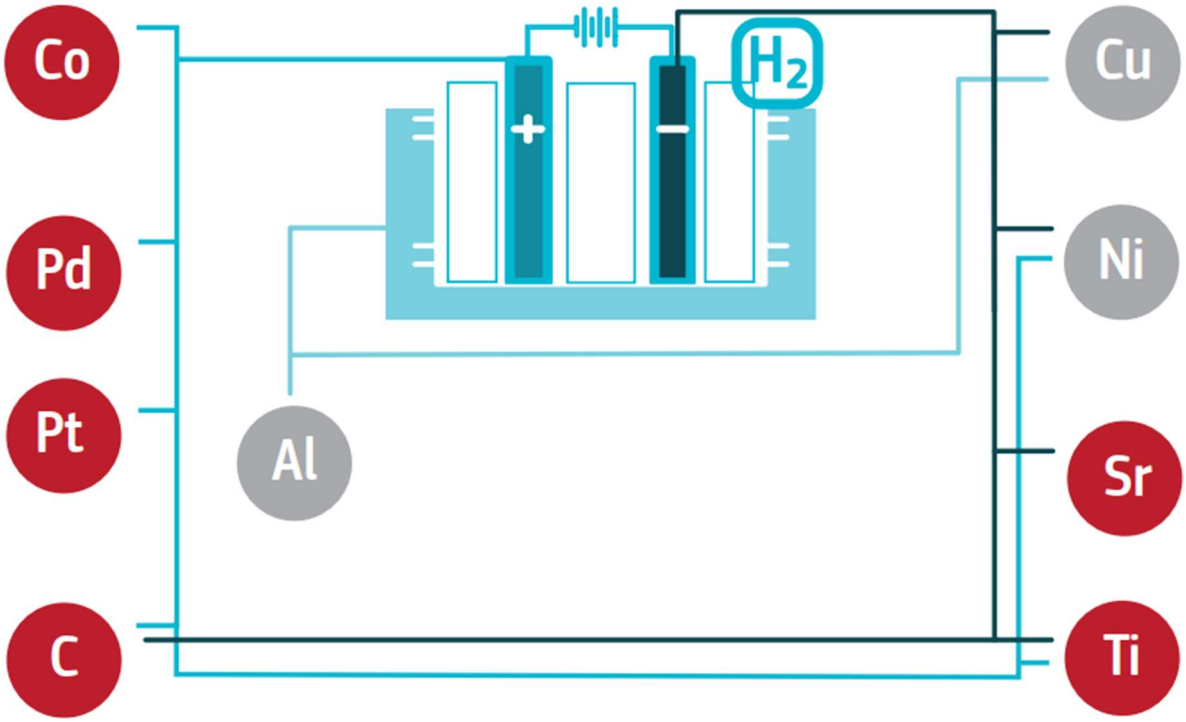


Рисунок 2.6. – Призначення критичної мінеральної сировини у технології паливних елементів [2]

Відповідно до схеми на рис. 2.6, для забезпечення розвитку технології паливних елементів необхідно залучити дев’ять критичних мінералів. Встановимо їх основні функції у даних виробах:

- Кобальт: як каталізатор, що замінює дорожчу платину в паливних елементах PEM.
- Паладій: як каталізатор, що замінює Pt (наприклад, як сплав Pt-Pd).
- Платина: найефективніший електрокаталізатор як для катода, так і для анода.
- Графіт: провідний матеріал для виготовлення біполярних пластин.
- Мідь: у сплавах з Ni для анодного каталізатора (SOFC), у проводах і провідних частинах.

- Нікель: для покриття біполярних пластин, у складі нержавіючої сталі або як анод.
- Стронцій: у складі анода (разом з Ti) в SOFCT.
- Титан: для металевої біполярної пластини та як анодний склад SOFC.

Розглянемо країни походження кожного із зазначених елементів на світовий ринок, і виклики що пов'язані зі сталим розвитком технології паливних елементів (рис. 2.7).

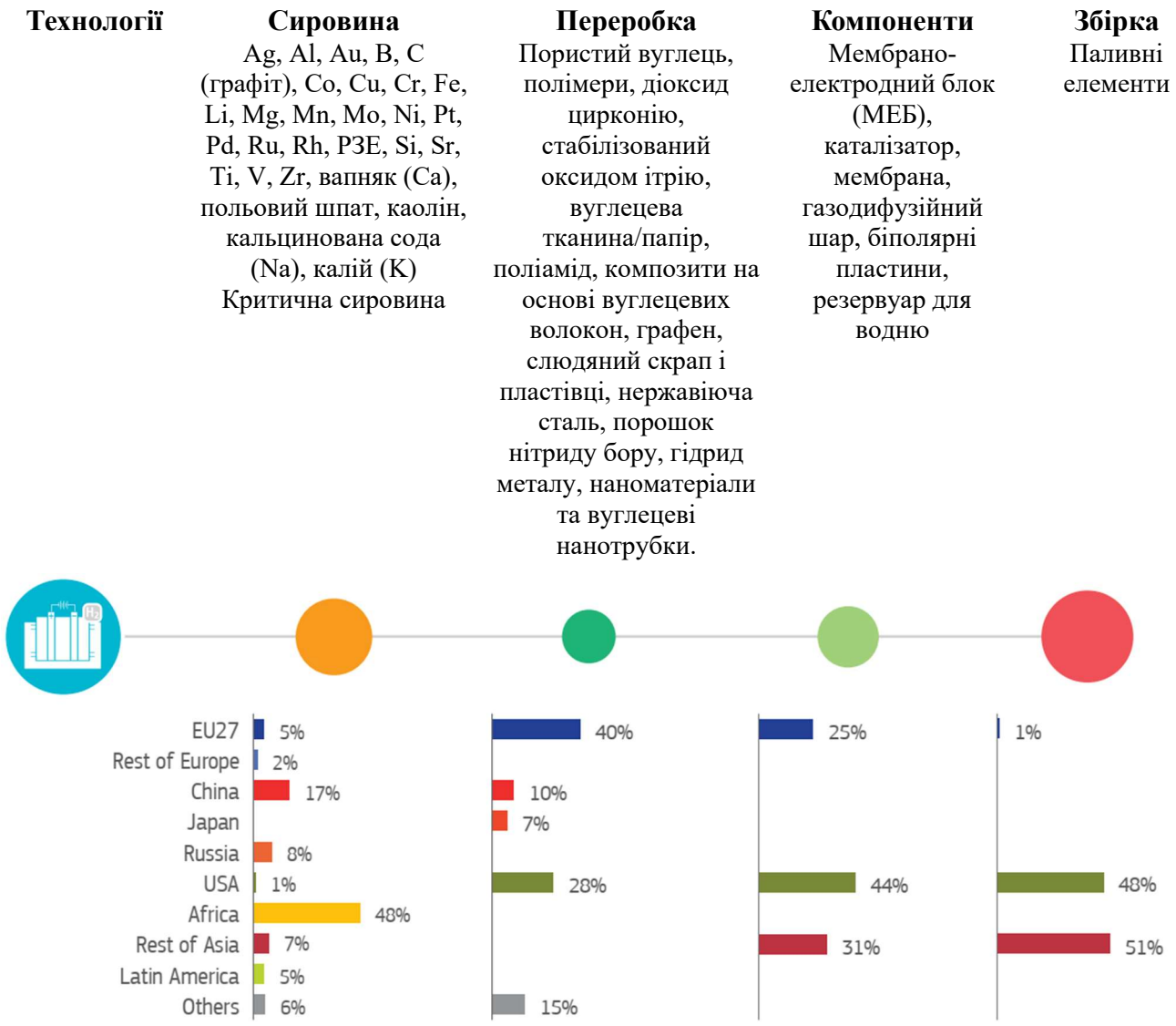


Рисунок 2.7. – Доля країн світу в різних технологічних процесах при виготовленні паливних елементів [2]

На рис. 2.8 продемонстровано результати прогнозу зростання загального автопарку автомобілів на водневому паливі до 2050 р. Відповідно до прогнозів, суттєве зростання попиту на технологію паливних елементів очікується після 2030 року. Це пов'язано зі здешевленням застосування технологічних рішень у водневих авто, а також розвитком інфраструктури заправних станцій, які на сьогодні знаходяться лише в обмежених локаціях і недоступні для пересічних споживачів.

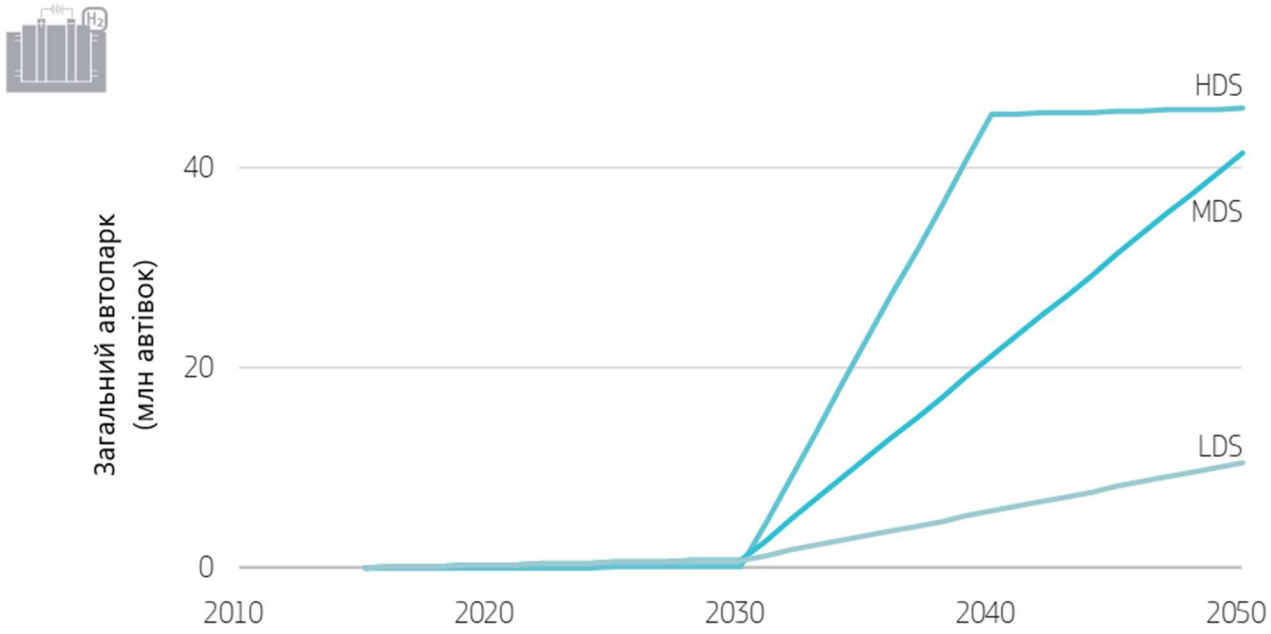


Рисунок 2.8. – Прогноз зростання загальної кількості водневих автомобілів у приватному і комерційному секторах в ЄС до 2050 року [2]

Як вже згадувалося раніше масова поява водневих автомобілів (FCEV) відкладається щонайменше на період після 2030 року через критичну неготовність інфраструктури, високу собівартість технологій та низьку енергетичну ефективність у порівнянні зі звичайними електромобілями (BEV). У той же час, світові автогіганти такі як Тойота вже зараз ефективно розвивають цей напрямок в очікуванні, що до 2030 року галузь розв'язуватиме фундаментальні проблеми, без яких масовий ринок просто неможливий.

У зв'язку з існуючими викликами для масового використання водневих технології Європейською Комісією розроблено ряд рекомендації щодо забезпечення галузі паливних елементів критичною мінеральною сировиною.

Як і в попередній технології необхідно забезпечити диверсифікацію поставок матеріалів: на відміну від літій-іонних акумуляторів, більше половини сировини для паливних елементів можливо закуповувати у численної кількості невеликих країн-постачальників.

Необхідно покращити виробничі можливості в ЄС. Паровий риформінг природного газу наразі є кращим варіантом для виробництва водню, який може відбуватися у дуже великому масштабі на джерелі або навіть локально на місці використання малими риформерами, інтегрованими з паливними елементами.

Переробка та повторне використання сировини. Не зважаючи на те, що переробка паливних елементів та водневих технологій може регулюватися законодавством, яке стосується таких аспектів, як дизайн, вибір матеріалу та закінчення терміну служби, їх переробка є новим бізнесом для переробників і потенційною темою для нових досліджень. Також пошук альтернативи платині у зазначених технологіях дозволить уникнути негайної проблеми високої ціни та доступності.

Спрямувати зусилля на науково-дослідні розробки, розвивати навички та компетенцію: сприяння дослідженням у сфері розвитку паливних елементів є здійсненним і може запропонувати привабливі можливості для ЄС. Для цього найважливішим партнером буде Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (Спільне підприємство з паливних елементів та водню). Це унікальне державно-приватне партнерство, створене для підтримки досліджень, технологічного розвитку та демонстрації технологій водневої енергетики у Європі.

Варто значну увагу приділити міжнародному співробітництву та стандартизації. Паливні елементи і водневі технології отримують вигоду від міжнародного підходу до розвитку необхідної інфраструктури, глобального ринку для великих кількостей водню та глобальних нормативних актів, що

забезпечують їх безпечне впровадження в усіх частинах світу. Результати досліджень також мають поширюватися на міжнародному рівні в рамках глобальної стандартизації та регуляторних зусиль.

2.4. Вітрогенератори

Вітроенергетика є однією з найефективніших технологій, яка вже декілька десятиліть використовується для пом'якшення наслідків зміни клімату. Сьогодні ці технології є важливим сектором промисловості значної частини Європейського Союзу. Подальше поширення цієї технології на ринках залежить від її техніко-економічних характеристик, нормативно-правової бази та ефективності енергетичної політики.

Також на розвиток галузі суттєво впливатимуть стабільність постачання матеріалів та динаміка цін на них. Сьогодні для адаптації до конкретних умов вітрогенераторів, що розміщуються на суші та в морі використовується різноманітне поєднання типів вітряних турбін. Зокрема, застосовуються як системи з прямим приводом (EESG та PMSG), так і моделі з редуктором (PMSG, DFIG та SCIG).

Наприклад для спорудження однієї сучасної промислової вітрової турбіни (потужністю 3–4,5 МВт для суші) зазвичай використовується від 200 до 400 тонн матеріалів лише для самої конструкції (башта, лопаті, гондола). При цьому лише величезний підземний фундамент, загальна маса споруди може перевищувати 1500 – 2500 тонн. Для спорудження повноцінної середньої вітрової електростанції загальною потужністю до 50 МВт, що поєднує у своєму складі 12–15 турбін, то загальна маса корисних копалин, які залучені в процес виготовлення може сягнути понад 25 000 – 35 000 тонн.

Не зважаючи на різні технології виготовлення вітрогенераторів, усі вони залежать від критичної мінеральної сировини, яка використовується в основних вузлах і деталях цієї конструкції (рис. 2.9).

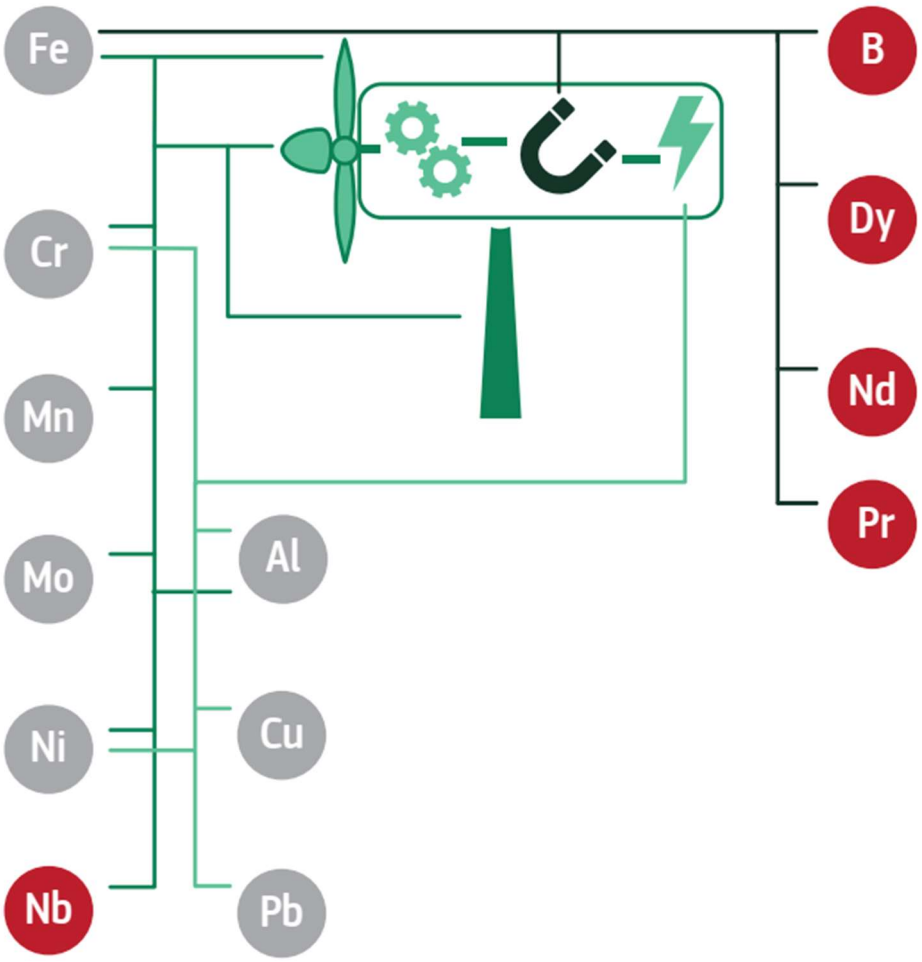


Рисунок 2.9. – Призначення критичної мінеральної сировини у технології вітрогенераторів [2]

Для виготовлення звичайного вітрогенератора (рис. 2.6), необхідно залучити понад 10 критичних елементів. Вони виконують наступні основні функції:

- Чавун: як матеріал або у складі сталі для вежі, мотогондоли, ротора та фундаменту, а також в постійних магнітах NdFeB;
- Хром: необхідний для нержавіючої сталі та інших сплавів у роторі та лопатях;
- Марганець: необхідний для виробництва сталі, який використовується для багатьох частин турбіни;
- Молібден: у складі нержавіючої сталі для багатьох компонентів турбіни;

- Нікель: у сплавах і нержавіючій сталі для різних компонентів турбіни;
- Ніобій: мікролегуючий елемент у високоміцній конструкційній сталі для башт турбіни;
- Алюміній: як легкий матеріал для обладнання гондол, лопатей тощо;
- Мідь: широко використовується в обмотках генераторів, кабелях, інверторах, системах керування;
- Свинець: для пайки або обшивки кабелю при передачі електроенергії (офшор);
- Бор: у складі неодим–залізо–борових (NdFeB) магнітів або як мастило;
- Диспрозій: важлива добавка до NdFeB постійних магнітів;
- Неодим: постійні магніти NdFeB для виробництва електроенергії;
- Празеодим: разом з неодимом у постійних магнітах.

На сьогодні існують наступні ризики для виготовлення компонентів та готових вітрогенераторів у ЄС (рис. 2.10).

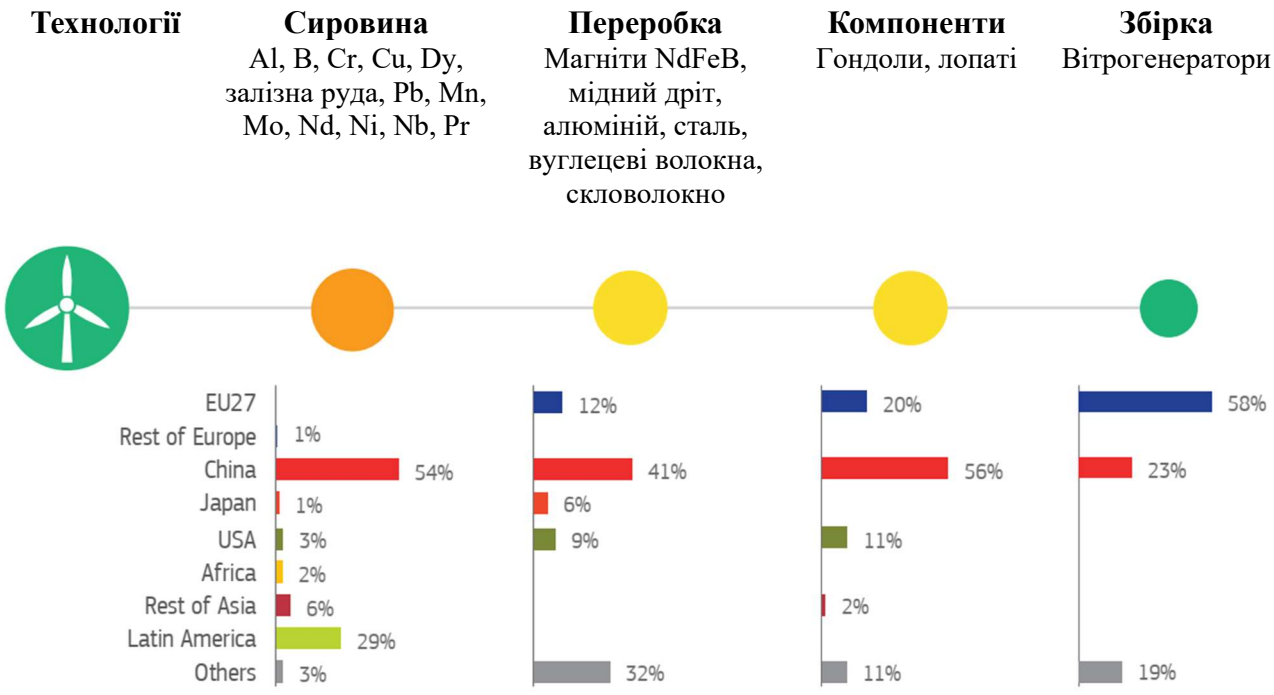


Рисунок 2.10. – Доля країн світу в постачанні та переробці сировини, а також при виготовленні деталей для вітрогенераторів [2]

Прогнозний розвиток максимальної електричної енергії, що можуть виробляти вітрогенератори на суші та в морі за трьома сценаріями наведено на рис. 2.11.

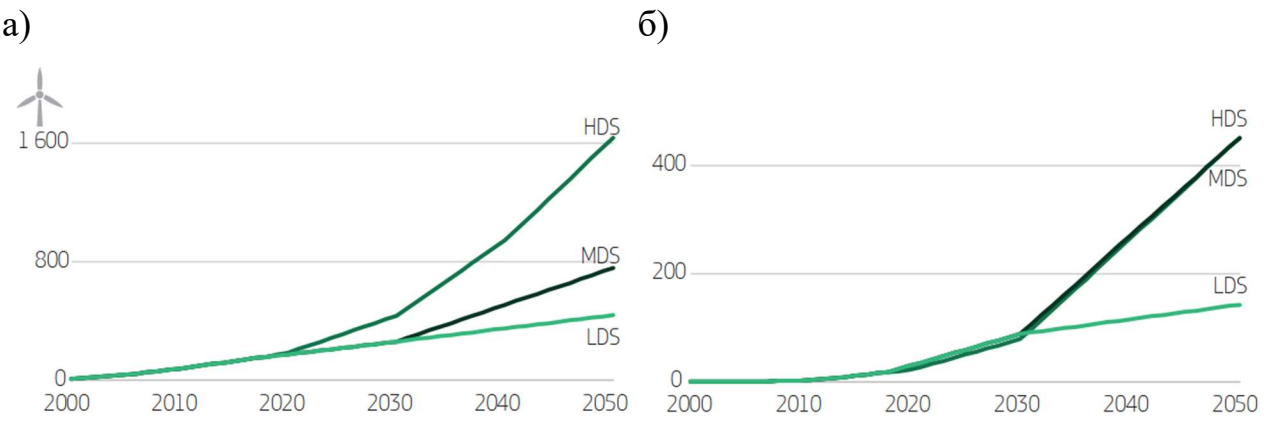


Рисунок 2.11. – Максимальна кількість електричної енергії, яку здатні виробляти вітроелектростанції до 2050 року, гігават: а) на суші; б) у морі

Прогнозні показники щорічного встановлення нових вітрогенераторів на суші та в морі наведено на рис. 2.12.

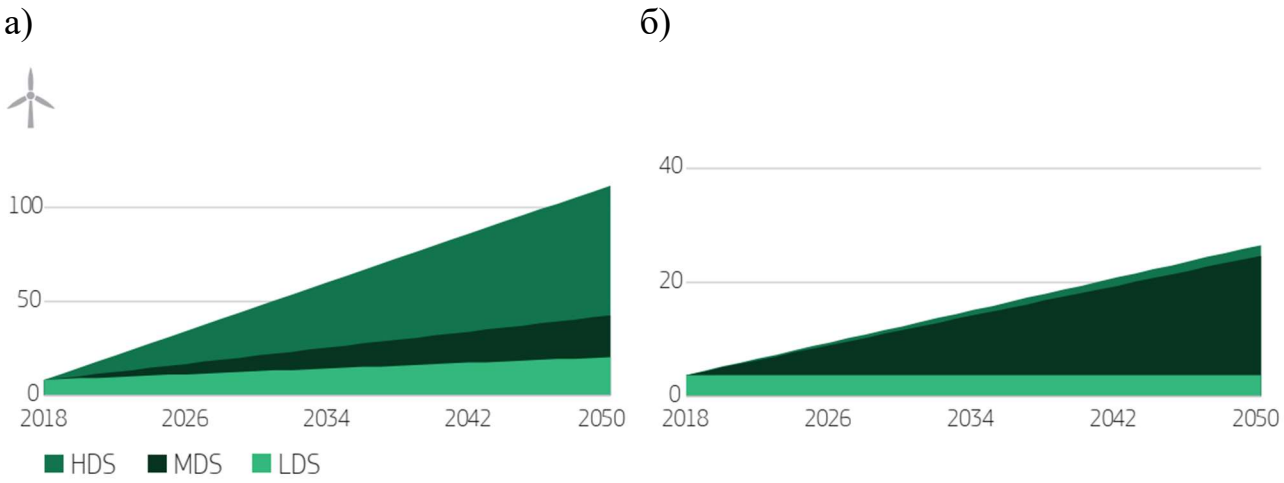


Рисунок 2.12. – Річний потенційний приріст вітрогенераторів до 2050 року, гігават: а) на суші; б) у морі

Під час проєктування вітрових електростанцій необхідно враховувати їх ресурс і планову заміну вузлів та агрегатів. Практичний досвід використання

вітрогенераторів дозволяє визначити, що середній термін служби сухопутних вітряних турбін становить 25 років, а морських – 30 років. Ці показники прийняті для основного сценарію розвитку (MDS). Для альтернативних сценаріїв (LDS та HDS) передбачено коливання терміну експлуатації в межах п’яти років у межах аналізу чутливості. Поєднання цих часових параметрів зі сценаріями потужності дає змогу вирахувати щорічні обсяги розгортання вітроенергетики, які безпосередньо визначають майбутній попит на матеріали.

Для сталого розвитку промисловості вітрогенераторів в ЄС розроблено ряд важливих рекомендацій, які враховують ризики забезпечення критичною мінеральною сировиною.

Як і для попередніх технології при виробництві складових для вітряних електростанцій потрібно досягти диверсифікації постачання матеріалів. У першу чергу для ЄС важливо диверсифікувати постачання РЗЕ через партнерство та участь у різноманітних поточних і майбутніх геологорозвідувальних проєктах у глобальному масштабі. Кілька шахт і заводів з переробки РЗЕ (рідкісноземельні елементи) зараз повільно нарощують виробництво після тривалих затримок. Хороший потенціал для видобутку РЗЕ також існує в Європі, як, наприклад, у Швеції, Фінляндії, Німеччині, Іспанії, Норвегії та Гренландії.

Необхідно покращити виробничі можливості у ЄС, що забезпечить окрім доступу до РЗЕ достатні потужності з їх переробки та виробництва постійних магнітів. Крім видобутку корисних копалин, переробка РЗЕ є критично важливим кроком через його високий вплив на навколишнє середовище. Таким чином, отримання первинної та вторинної сировини також може стимулювати компанії, що виробляють спечені магніти на основі неодиму, які зараз зникають з ЄС. Моніторинг інновацій і нових розробок (наприклад, магніти з нітриду заліза), а також можливість ініціювати виробництво або своєчасно укласти контракти з країнами-виробниками.

Варто зосередитися на переробці та повторному використанні та заміні існуючих компонентів. Так одним із можливих способів забезпечити майбутній доступ ЄС до РЗЕ, що використовуються у вітрових турбінах, електромоторах та

інших високотехнологічних застосуваннях, є стала переробка вторинних матеріалів. Необхідно якнайшвидше в ЄС створити відповідні потужності зі збору та переробки, щоб мати справу зі зростаючими потоками використаних постійні магнітів з промислового обладнання. Зважаючи на специфіку процесів переробки, належне регулювання та впровадження системи маркування із зазначенням типу магнітів полегшить процес переробки відпрацьованих приладів та значно знизить собівартість процесів.

Розвиток промисловості вітрогенераторів також залежить від новітніх науково-дослідних розробок. Пошук інноваційних високоефективних методів очищення, розділення та переробки може зменшити ризик постачання для деяких CRM, особливо рідкісноземельних металів. Технології переробки РЗЕ все ще знаходяться на ранніх стадіях розробки та стикаються з невід'ємними труднощами: багато інших пристроїв містять менше одного грама цінних РЗЕ, а дизайн продукту надто складний для легкого розділення компонентів, що робить процес переробки дорогим і неконкурентним.

2.5. Виготовлення тягових двигунів

У Європейському Союзі сьогодні використовується близько 8 мільярдів електродвигунів, на частку яких припадає майже половина електрики, що споживається в регіоні. Очікується, що в майбутньому кількість таких двигунів значно зросте, головним чином за рахунок масового впровадження тягових двигунів в електромобілях.

Для забезпечення високої ефективності, легкості та потужності у більшості гібридних та електричних машин застосовуються синхронні двигуни з постійними магнітами типу NdFeB. Ці неодимові магніти є найпотужнішими на ринку і містять у своєму складі такі рідкісноземельні елементи, як неодим, празеодим та диспрозій. Використання технології постійних магнітів є критичним для компактних гібридних автомобілів, де виробникам доводиться економити простір при поєднанні електричного та бензинового двигунів.

Приклад використання критичної мінеральної сировини у тягових електричних двигунах наведено на рис. 2.13.

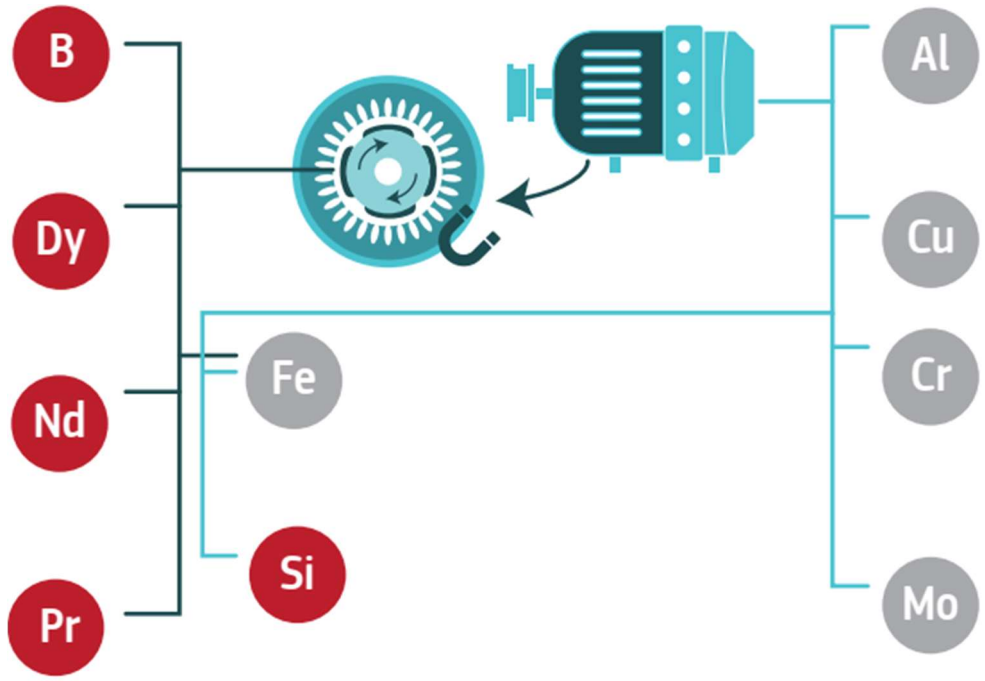


Рисунок 2.13. – Використання критичної мінеральної сировини у технології постійних тягових двигунів [2]

Виробництво сучасних тягових двигунів (рис. 2.13), потребує залучення понад восьми критичних елементів. Вони застосовуються з наступною метою:

- Бор: у складі неодим–залізо–бор (NdFeB) магнітів;
- Диспрозій: важлива добавка до неодим-залізо-бор (NdFeB) постійних магнітів;
- Неодим: постійні магніти NdFeB у роторі двигуна для створення сильного магнітного поля;
- Празеодим: разом з неодимом у постійних магнітах;
- Залізо: як чавун або у складі сталі для корпусів і в магнітах NdFeB;
- Кремній: кремній для електроніки в напівпровідниках, керуюча електроніка; легуючий елемент в сплавах Al і кремнієвій сталі;
- Алюміній: в корпусах і як легкий матеріал в інших металевих частинах;

• Мідь: широко використовується в обмотках, кабелях, інверторах, системах керування;

• Хром: у складі нержавіючої сталі та стійких до корозії сплавів у різних компонентах двигуна;

• Молібден: у складі нержавіючої сталі та сплавів для корпусу та вала електродвигуна.

Розподіл ланцюгів постачання критичної сировини за країнами світу наведено на рис. 2.14.

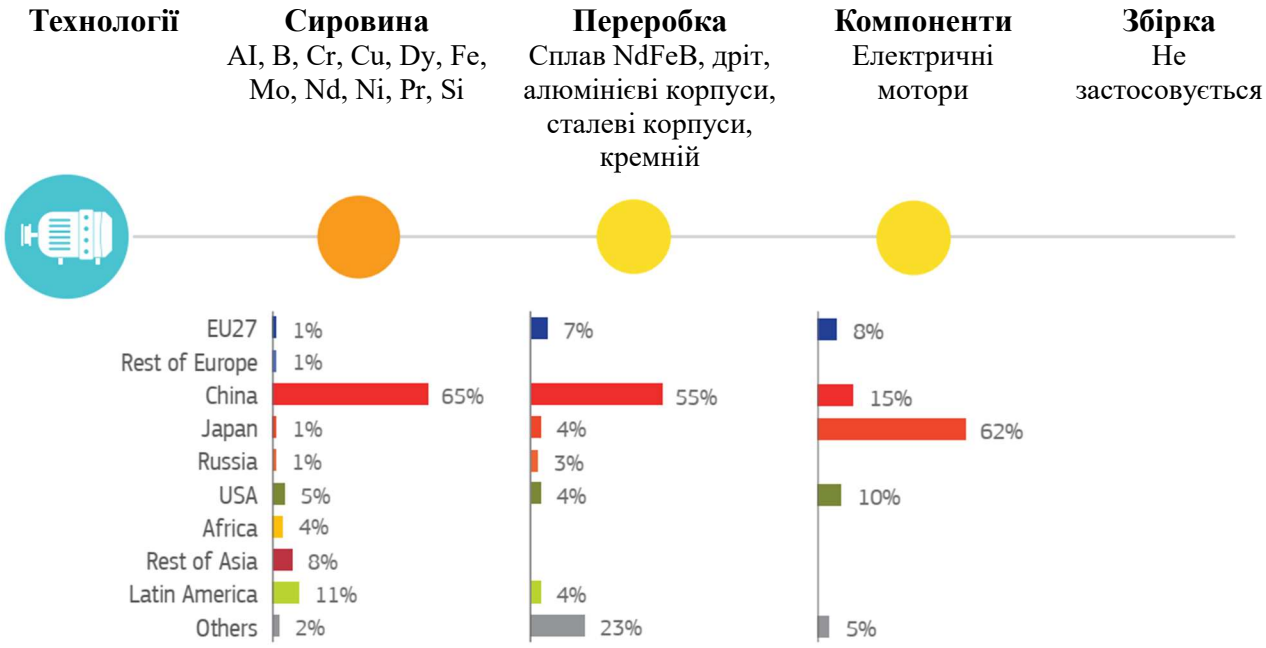


Рисунок 2.14. – Доля країн світу в постачанні та переробці сировини, а також виготовленні компонентів тягових електродвигунів [2]

Глобальний перехід на електромобільність спровокував різке зростання попиту на тягові електродвигуни, що створило серйозні виклики для світової промисловості. Головною проблемою є критична залежність від рідкісноземельних елементів (неодиму та диспрозію), видобуток і переробку яких майже повністю контролює Китай. На рис. 2.15 представлені результати прогнозної оцінки зростання потреби у тягових двигунах для електромобілів.

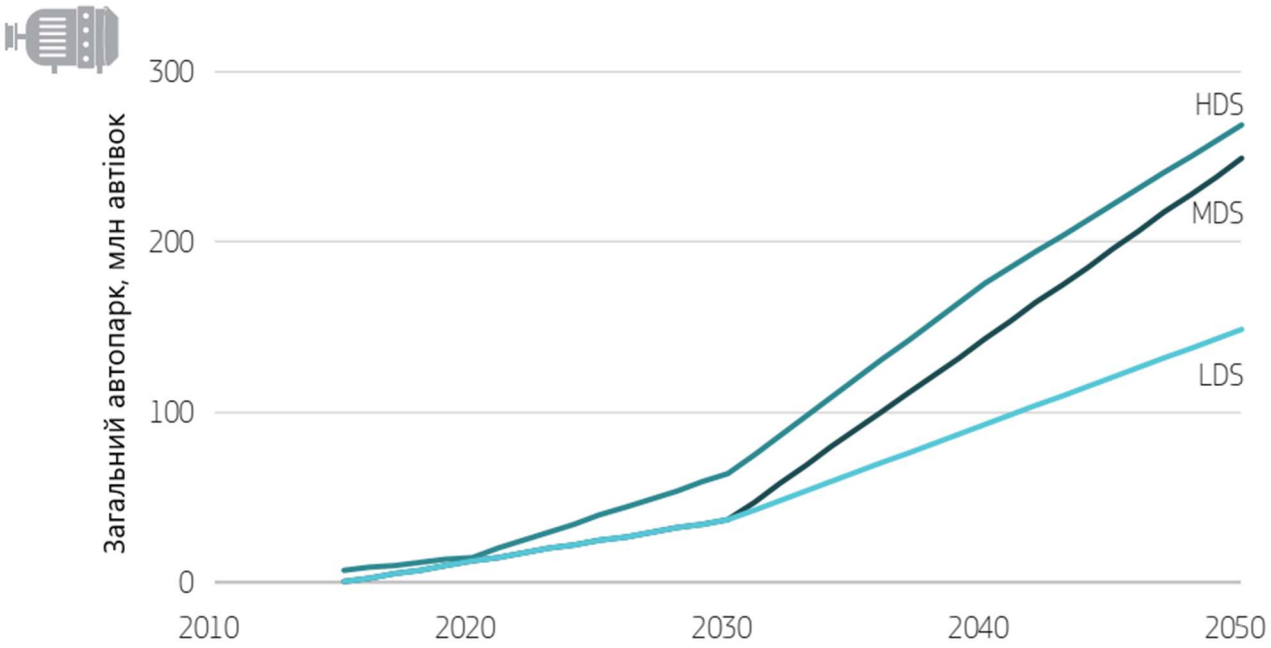


Рисунок 2.15. – Прогнозне зростання загального автопарку електрокарів, гібридних і водневих авто [2]

Різке збільшення об’єму виробництва (рис. 2.15) посилює дефіцит інших важливих матеріалів, зокрема міді високої чистоти та спеціальної електротехнічної сталі. Через це світові автовиробники змушені інвестувати в розробку інноваційних безмагнітних двигунів та створювати нові локальні ланцюги постачання, щоб зменшити геополітичні ризики. Водночас перед інженерами стоїть складне завдання мінімізувати екологічний слід від утилізації та вторинної переробки відпрацьованих двигунів у майбутньому.

З метою захисту споживачів ЄС розроблено рекомендації щодо отримання критичних мінералів для тягових двигунів, які передбачають наступні кроки.

Диверсифікація постачання матеріалів: через партнерство та участь у різноманітних поточних і майбутніх проєктах розвідки РЗЕ у глобальному масштабі. Кілька шахт і заводів з переробки РЗЕ зараз повільно нарощують виробництво після тривалих затримок. Хороший потенціал для видобутку РЗЕ також існує в ЄС.

Необхідно покращити виробничі можливості в ЄС: розвиток потужностей з переробки РЗЕ та виробництва постійних магнітів буде важливим для ЄС, оскільки ці кроки можуть вплинути на наступні етапи ланцюга створення вартості (наприклад, дизайн двигунів і транспортних засобів).

Переробка та повторне використання вторинних матеріалів може сприяти покращенню майбутнього доступу ЄС до РЗЕ. Збір, демонтаж і повторне використання матеріалів з менших електродвигунів можна покращити, оскільки наразі більшість цих потоків «брухту» експортується до Азії.

Потрібно сприяти інвестиціям у дослідження та розробки, розвивати навички з розробки інноваційних економічно ефективних методів обробки, розділення та переробки РЗЕ. Рекомендується подальше дослідження замінників і «недорогих магнітів», що може покращити безпеку постачання для ЄС.

Необхідно сприяти міжнародному співробітництву та стандартизації компонентів та виробів. Вимоги екодизайну є важливими для підвищення рівня повторного використання та переробки, включаючи збільшення використання перероблених матеріалів у нових продуктах.

2.6. Сонячні електростанції

Фотоелектрична (PV) технологія перетворює сонячну енергію на електроенергію і разом із вітроенергетикою лідирує в трансформації світового енергетичного сектора. Завдяки інноваціям, масштабуванню виробництва та досвіду вартість сонячної енергії суттєво знизилася, що викликало стрімке зростання її використання у світі.

Комерційний ринок пропонує кремнієві технології на основі пластин (моно- та мультикристалічні) та тонкоплівкові рішення. Кристалічний кремній залишається домінуючою технологією, на яку припадає близько 95% усіх встановлених потужностей у світі. Водночас тонкоплівкові елементи є гнучкими й чудово підходять для інтеграції в будівлі, а аморфний кремній частіше застосовують у малопотужних пристроях. Решта критичних мінералів, що використовуються у сонячних панелях представлена на рис. 2.16.

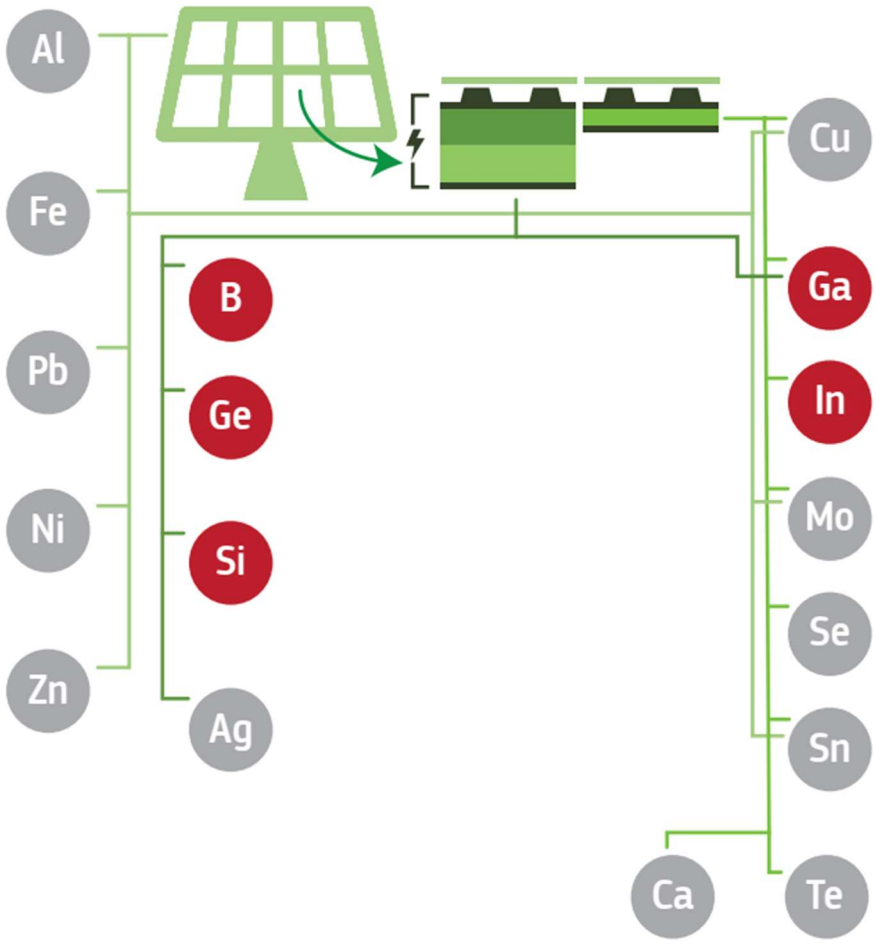


Рисунок 2.16. – Використання критичної мінеральної сировини при виготовленні сонячних панелей [2]

Виробництво сонячних електростанцій (рис. 2.13) вимагає великої кількості різної критичної сировини. При виготовленні їх за класичною технологією необхідно залучити понад 15 критичних металів, які виконують наступні функції:

- Алюміній: у панельних каркасах і інверторах або в сплавах для конструкції та підтримки;
- Свинець: у сплавах з оловом (Sn) як припій для електричних ланцюгів і з'єднувачів;
- Нікель: у гальваніці або в рамах, кріпленнях і з'єднувачах з нержавіючої сталі;
- Цинк: як прозорий провідний оксид у передньому контакті сонячних елементів;

- Бор: як присадка (р-тип) у кристалі решітки пластин на основі кремнію;
- Германій: як напівпровідниковий матеріал для багатоперехідних сонячних батарей;
- Кремній: як напівпровідниковий матеріал у кристалічних або аморфних сонячних елементах;
- Срібло: як провідна паста на передній і задній стороні кристалічних сонячних елементів;
- Кадмій: фотоелектрична технологія тонкоплівкового телуриду кадмію (CdTe);
- Тонкоплівковий селенід міді, індій-галію (CIGS) або оксид індію-олова (ITO);
- Мідь: широко використовується для проводів, кабелів, інверторів, а також у технології CIGS;
- Галій: як присадка у напівпровідниках або в технології CIGS;
- Індій: як провідний шар ITO або в технології CIGS;
- Молібден: як задній контакт для CIGS або в рамах з нержавіючої сталі;
- Селен: у тонкоплівкових сонячних елементах CIGS;
- Телур: у фотоелектричній технології тонкоплівкового телуриду кадмію (CdTe);
- Олово: у поєднанні зі свинцем для пайки або з індієм у провідних шарах (ITO).

Технологія фотовольтаїки має високу залежність від погодних умов і часу доби, що зумовлює нестабільність генерації електроенергії без використання дорогих систем накопичення. Виробництво та подальша утилізація сонячних панелей створюють екологічні ризики через використання токсичних хімічних речовин і важких металів.

Швидкий розвиток індустрії та коливання цін на сировину провокують фінансову нестабільність і ризики втрати капіталовкладень для інвесторів. Фізичне пошкодження обладнання через екстремальні погодні явища, такі як

град або урагани, може суттєво скоротити термін служби станцій. Крім того, інтеграція великих обсягів сонячної генерації створює технічні виклики для енергомереж, викликаючи перевантаження та дисбаланс частоти.

У той же час технології фотовольтаїки суттєво залежать від постачання на ринок критичної мінеральної сировини і наявності домінуючої країни постачальника Китаю (рис. 2.17).

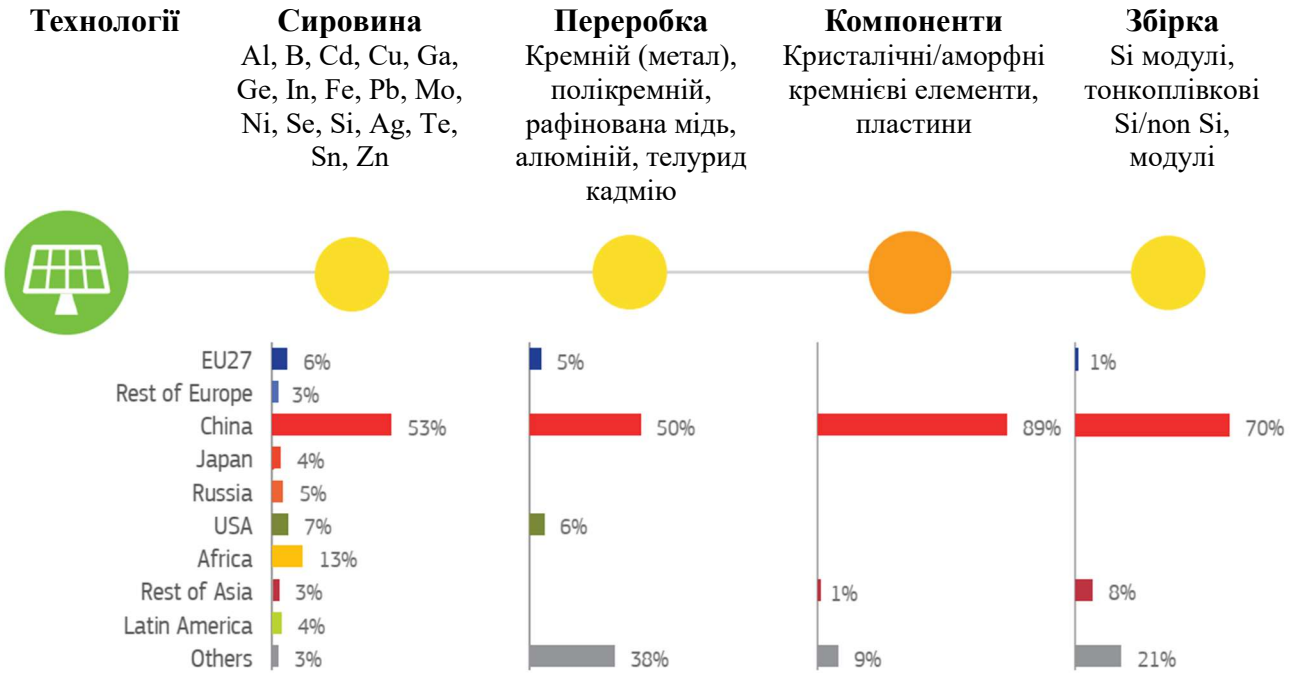


Рисунок 2.17. – Доля країн світу в постачанні критичних матеріалів і виготовленні компонентів для технологій сонячних електростанцій [2]

Технологія фотовольтаїки стрімко розвивається завдяки впровадженню високоефективних елементів на основі кремнію. Сучасні виклики для індустрії полягають у інтеграції сонячних панелей безпосередньо у будівельні матеріали (BIPV) та кузови електромобілів, що перетворить їх поверхні на автономні джерела енергії. Розширення масштабів плавучих та агрофотовольтаїчних станцій дозволяє ефективно використовувати простір, вирішуючи проблему дефіциту земельних ресурсів.

Завдяки штучному інтелекту та смарт-мережам керування генерацією стає точнішим, що значно підвищує стабільність енергосистем. У найближчі десятиліття зниження вартості виробництва та вдосконалення систем накопичення енергії зроблять сонячну генерацію домінуючим та найдешевшим джерелом електрики у світі (рис. 2.18, 2.19).

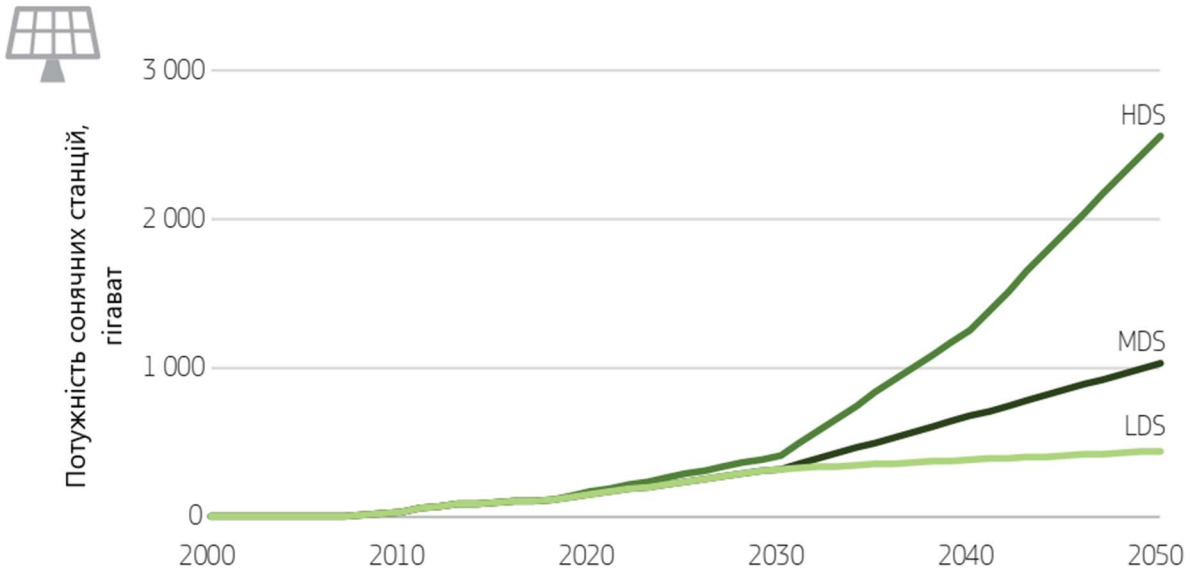


Рисунок 2.18. – Загальна потужність сонячних електростанцій в ЄС за трьома сценаріями, гігават [2]

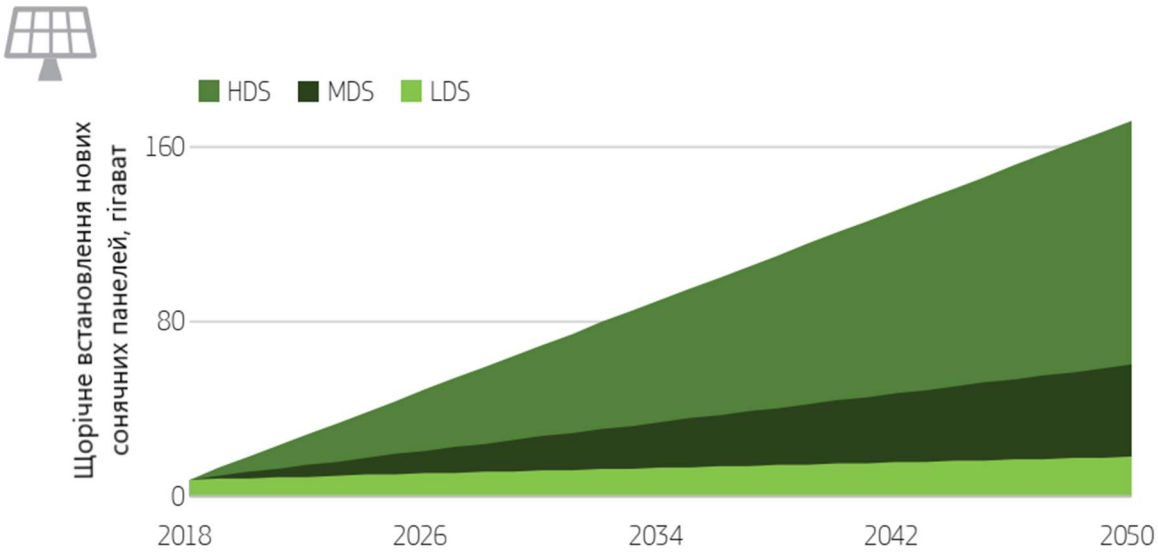


Рисунок 2.19. – Прогноз щорічного встановлення нових сонячних панелей в ЄС, гігават [2]

З метою забезпечення промисловості з виготовлення сонячних панелей в ЄС, розроблено рекомендації щодо отримання необхідних критичних мінералів.

Диверсифікація постачання матеріалів: ризик постачання сировини для фотоелектричних технологій оцінюється як середній. Оскільки кристалічний кремній домінує у світовому виробництві панелей, йому слід приділити особливу увагу. ЄС є нетто-імпортером металевого кремнію, покриваючи за рахунок імпорту 64% своїх потреб. Європі складно конкурувати у світовому виробництві кремнію, оскільки його обробка є енергоємною та вуглецевою. Тому ЄС має забезпечити стабільний доступ до сировини з таких країн, як США, Бразилія та Норвегія.

Необхідно покращити виробничі можливості в ЄС: зважаючи на мінімальне внутрішнє виробництво сонячних елементів, є потреба у зменшенні залежності від імпортних модулів, хоча конкурувати з Китаєм буде складно. ЄС має потужності для випуску сонячного кремнію, але дефіцит виробництва готових елементів залишається найслабшою ланкою ланцюжка створення вартості. Вихід на масовий ринок ускладнений через нижчу собівартість виробництва в Азії. Проте існує високий потенціал для розширення ринкового сегменту індивідуальних фотоелектричних продуктів завдяки хорошим ринковим перспективам та близькості до європейських клієнтів.

Переробка та повторне використання, заміна: переробка сонячних панелей лише починається, оскільки обсяг відпрацьованих продуктів поки що низький. Металевий кремній наразі не відновлюється з відходів після споживання, але є потенціал для його переробки з промислового металобрухту. Більшість кремнієвого брухту від виробництва зливків і пластин для електроніки можна використовувати у фотоелектриці. Цей потенціал обмежений, оскільки електроніка становить лише 2% кінцевого використання кремнію. Таким чином, головним джерелом вторинної сировини для фотоелектричної промисловості має стати сама галузь, для виробництва модулів з використанням важливих вторинних матеріалів.

Сприяти науково-дослідним розробкам, розвивати навички та компетенції: дослідження та інновації необхідні для підвищення ефективності використання матеріалів, покращення переробки та пошуку замінників. Інновації також підтримають гірничодобувну промисловість в ЄС, допомагаючи вирішувати завдання глибшого видобутку та ефективного використання хвостів збагачення для відновлення матеріалів. Розробка інноваційних методів переробки фотоелектричних модулів дозволить відновлювати більше матеріалів, зменшуючи імпортозалежність. Європейська стратегія досліджень також повинна розглянути вдосконалення сонячних елементів чи інших сполук як потенційних замінників кремнію.

2.7. Робототехніка

Сучасний розвиток робототехніки в ЄС стикається з серйозним дефіцитом висококваліфікованих інженерів та дослідників, що уповільнює темпи впровадження інновацій. Крім того, європейські компанії зазнають жорсткої конкуренції з боку США та Китаю, які мають більші обсяги фінансування та швидше комерціалізують технології.

Суворі нормативно-правові акти ЄС, зокрема у сфері штучного інтелекту та безпеки даних, створюють додаткові бюрократичні бар’єри для розробників технологій робототехніки. Також існує проблема високої вартості інтеграції роботів у традиційні сектори економіки, через що малий та середній бізнес часто не може дозволити собі таку модернізацію. Наостанок, значним викликом залишається суспільне занепокоєння щодо автоматизації, яка потенційно може призвести до масового скорочення робочих місць.

Додатковим викликом для європейської робототехніки є забезпечення критичною сировиною і залежність від імпорту рідкісноземельних елементів, які використовують для виробництва електромоторів і сенсорів (рис. 2.20). Через високу геополітичну концентрацію поставок, переважно з Китаю, виробничі ланцюги ЄС залишаються вкрай вразливими до будь-яких логістичних чи політичних збоїв.

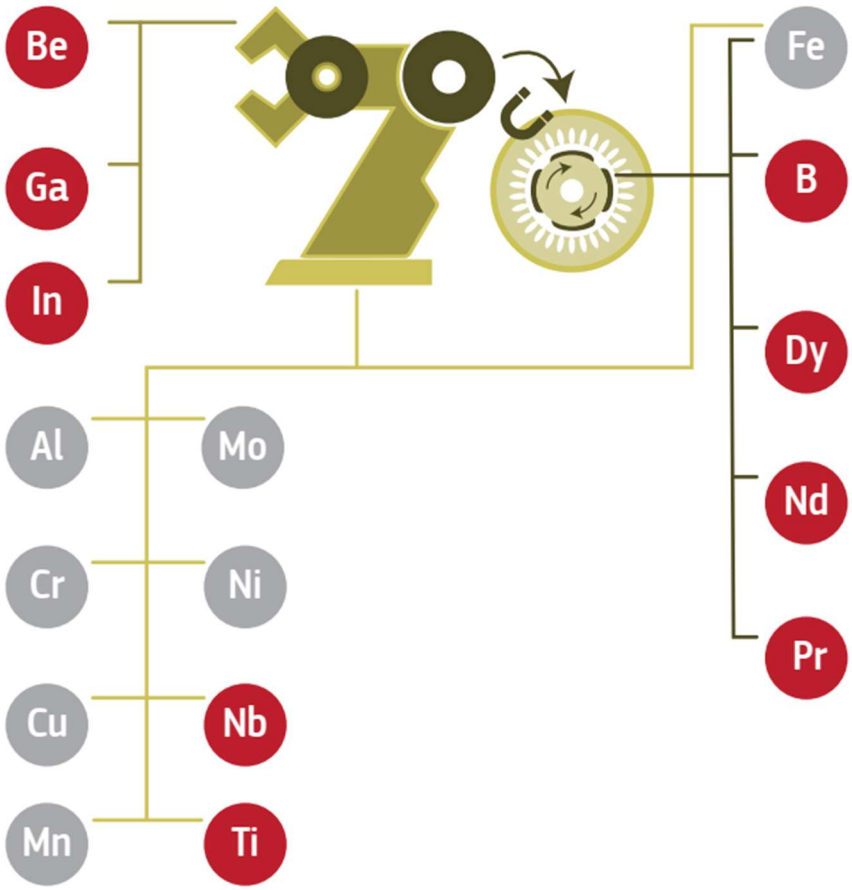


Рисунок 2.20. – Використання критичної мінеральної сировини у технологіях робототехніки [2]

Промисловість робототехніки вимагає великої кількості різної критичної сировини (рис. 2.20). Розглянемо призначення основних 15 критичних металів, які використовуються у робототехніці:

- Берилій: у сплавах, електрооптичних системах і роботизованих хірургічних пристроях;
- Галій: для комунікаційних, електрооптичних і енергетичних систем;
- Індій: у сполуках для електрооптичних систем, датчиків і натяжної шкіри;
- Алюміній: як легкий і високоефективний сплав у різних компонентах;
- Хром: необхідний для нержавіючої сталі та інших сплавів у роботах;
- Мідь: широко використовується в дротах, осях або в корозійностійких сплавах;

- Марганець: незамінний у сталевих сплавах, які використовуються для багатьох частин робота;
- Молібден: у сплавах нержавіючої сталі для багатьох компонентів робота;
- Нікель: у гальваніці або в рамах, кріпленнях і з'єднувачах з нержавіючої сталі;
- Ніобій: мікролегуючий елемент у високоміцній конструкційній сталі;
- Титан: у сплавах і високо-міцній конструкційній сталі для приводів і рук роботів;
- Бор: у неодим-залізо-бор (NdFeB) постійних магнітах або як мастило;
- Диспрозій: важлива добавка до постійних магнітів NdFeB;
- Неодим: постійні магніти NdFeB для виробництва електроенергії;
- Празеодим: разом з неодимом у постійних магнітах.

Розподіл ланцюгів постачання критичної сировини для робототехніки за країнами світу наведено на рис. 2.21.

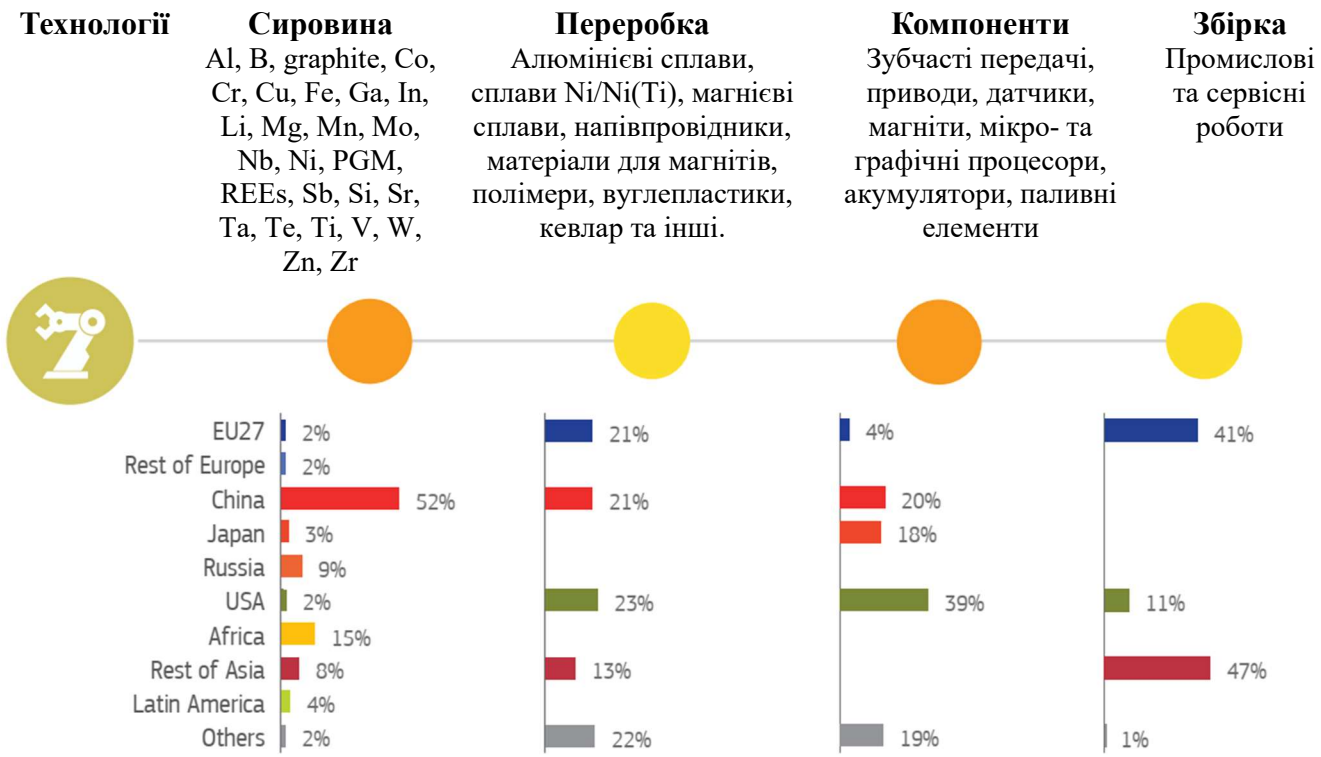


Рисунок 2.21. – Доля країн світу в постачанні критичних матеріалів і виготовленні компонентів для робототехніки [2]

Промислові роботи призначені для автоматизації важких і монотонних завдань на виробництві, таких як зварювання, збирання чи пакування продукції. Вони працюють у чітко визначеному просторі, відрізняються високою точністю, швидкістю та здатністю витримувати великі навантаження.

Натомість сервісні роботи створені для безпосередньої взаємодії з людьми та надання послуг поза промисловим середовищем. Вони допомагають у логістиці, медицині, прибиранні, а також у сфері обслуговування клієнтів. Головна відмінність між ними полягає в тому, що промислові машини оптимізують масове виробництво, тоді як сервісні – покращують якість повсякденного життя та сервісу (рис. 2.22).

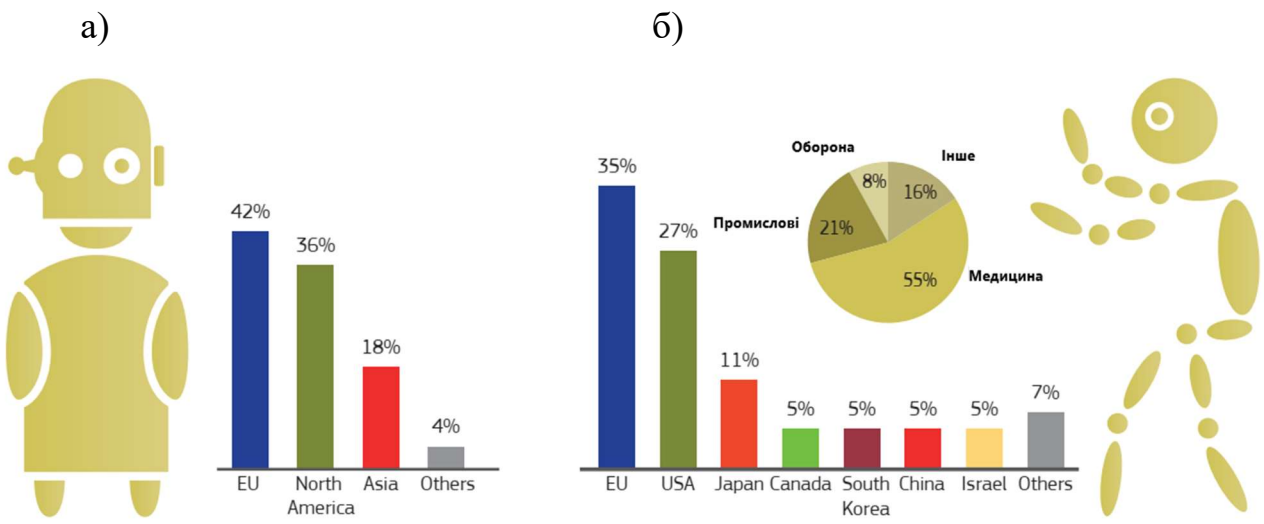


Рисунок 2.22. – Частка виробництва сервісних роботів і екзоскелетів за країнами: а) промислові роботи; б) екзоскелети [2]

Аналіз попиту на перспективні розробки робототехніки у світі [2] дозволяють стверджувати, що найшвидшими секторами робототехніки будуть споживча (>20%) і комерційна робототехніка (>13%). Для конкретних сфер послуг, таких як медичні роботи, очікується зростання понад 20%. За прогнозами експертів очікується, що глобальний ринок робототехніки зросте з 27 мільярдів доларів США (більше 3 мільйонів одиниць буде продано) до 60,5 млрд у 2030

році, а у 2040 році він може сягнути 494,7 мільярда доларів США, що становитиме понад 28 мільйонів одиниць.

Для забезпечення сучасних викликів у галузі робототехніки розроблено перелік рекомендацій щодо отримання критичних мінеральних ресурсів.

Як і для попередніх технології диверсифікація поставок матеріалів відіграє ключову роль оскільки Китай постачає понад третину сировини для робототехніки, а ПАР – 7%. Суттєвим ризиком є те, що частка дрібних постачальників не перевищує 6%, проте існують достатні можливості для диверсифікації.

Покращення виробничих можливостей в ЄС. Домінування іноземних постачальників ключових компонентів (наприклад, графічних процесорів) загрожує розвитку робототехніки. Єврокомісія може запропонувати державам-членам стимулювати місцевих виробників комплектуючих інвестувати в ЄС та підтримувати нові підприємства. Крім того, можна оновити заходи щодо обмеження імпорту компонентів з-поза меж ЄС.

Переробка, повторне використання та заміна. Необхідно стимулювати еко-дизайн робототехніки. Це забезпечить ефективніше використання матеріалів та енергії, легке розбирання компонентів, а також їх повторне використання чи переробку.

Забезпечення висококваліфікованої робочої сили полягає у браку кадрів (інженерів високого рівня та докторів наук з робототехніки). Це є серйозним вузьким місцем для ЄС, особливо на тлі конкуренції з Китаєм та Індією. Слід заохочувати компанії та наукові кола виявляти дефіцит навичок. Єврокомісія може підтримати програми перепідготовки, а зацікавленим сторонам варто використовувати Європейські інвестиційні фонди.

Сприяти дослідженням і розробкам, оскільки основним напрямком є створення легких і високоміцних матеріалів (сплави магнію, алюмінію, титану, спеціальні сталі та композити).

У контексті розвитку компонентів та екзоскелетів потрібно розвивати меншу, потужнішу й точну електроніку з кіберфізичним захистом, що критично

для автономних систем зі ШІ. У сфері екзоскелетів перспективними є ПЗ для координації рухів, моніторинг стресу, системи візуального доповнення та дистанційні датчики.

2.8. Дрони (БПЛА)

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), загальновідомі як дрони – це вироби, які літають без пілота та можуть бути одноразовими або багаторазовими. Починаючи з 1970-х років, сфера цивільного використання дронів значно розширилася, що призвело до продажу понад мільйона одиниць до 2015 року в таких галузях, як сільське господарство, логістика та наука.

Проте, хоча цивільні БПЛА лідирують на ринку за кількістю проданих пристроїв, військові розробки все ще домінують за фінансовою вартістю. Для цивільних і комерційних завдань ці апарати широко використовуються для дистанційного зондування, інспектування інфраструктури та охорони кордонів. Крім того, дрони відіграють важливу роль у логістичному секторі, забезпечуючи транспортування товарів і посилок (рис. 2.23).



Рисунок 2.23. – Сфери застосування БПЛА цивільного та оборонного призначення [2]

Головним викликом для розвитку технологій БПЛА в ЄС є висока залежність від обмеженої кількості країн-постачальників критичної сировини, зокрема Китаю, який контролює понад третину її видобутку і переробки. Особлива увага зосереджена на рідкісноземельних елементах для електроніки і виробництві акумуляторів. Посилення геополітичної напруженості та торговельні обмеження створюють серйозні ризики раптового переривання ланцюгів постачання компонентів вищого рівня. Ситуацію ускладнює дефіцит власних потужностей в ЄС та інших західних країнах для видобутку й екологічного перероблення магнію, літію, кобальту та титанових сплавів (рис. 2.24).

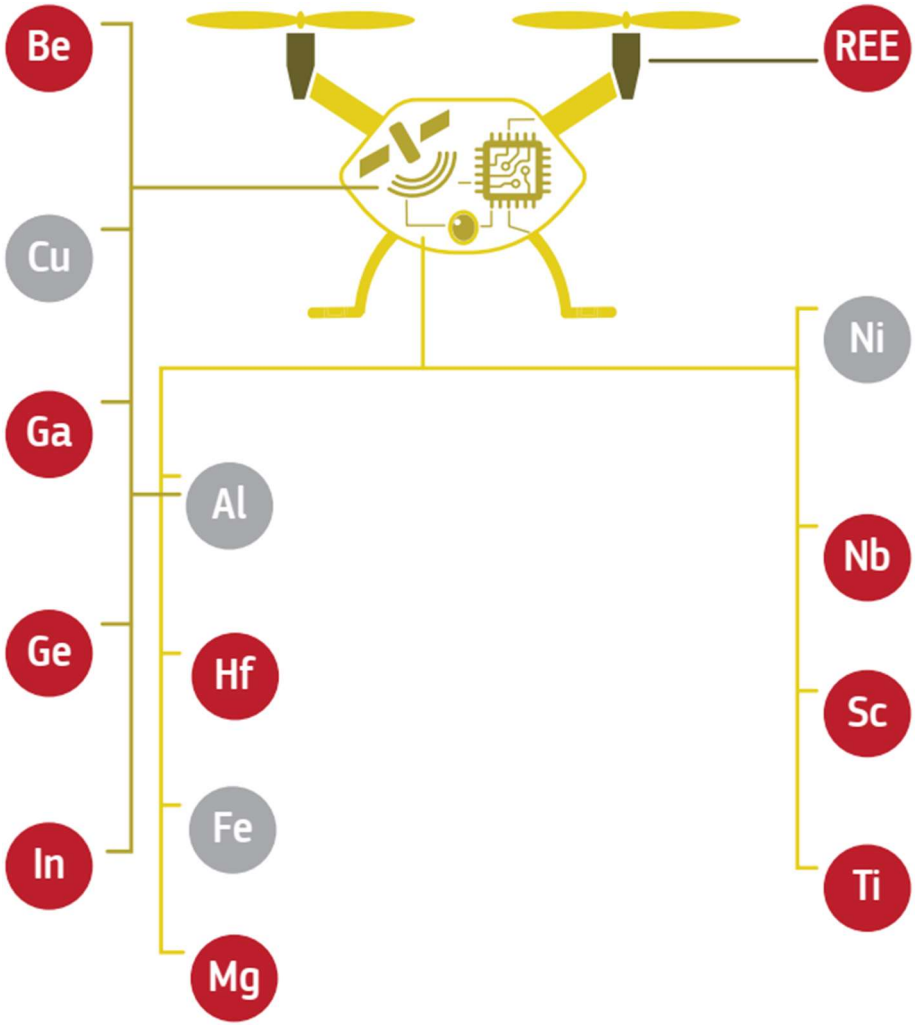


Рисунок 2.24. – Використання критичної мінеральної сировини при виробництві БПЛА [2]

Виготовлення готових БПЛА вимагає значної кількості окремих видів критичної сировини (рис. 2.24). Нижче наведено призначення основних 13 критичних металів у технології виробництва БПЛА:

- Берилій: у сплавах, комунікаційному обладнанні та інтегрованих дротових мережах, електрооптиці, шасі;
- Мідь: легуючий елемент у суперсплавах і сплавах CuBe, комунікаційне обладнання;
- Галій: для систем зв'язку та ідентифікації (GaAs і GaN, 5N), також в електрооптичних системах;
- Германій: бортова електроніка, інерціальні навігаційні системи (5N) і бойове розпізнавальне обладнання;
- Індій: у сполуках для електрооптичних систем;
- Алюміній: легкі та високо-ефективні сплави, що використовуються для корпусів літаків, корпусів передач, авіоніки;
- Гафній: суперсплави на основі нікелю, висока міцність і висока температура;
- Магній: у високоефективних сплавах Al-Mg;
- Рідкісноземельні елементи: Nd, Pr і Dy використовуються в (маленьких) електродвигунах з електронним контролем швидкості (ESC);
- Нікель: для сплавів Ni та NiTi (серія Хастелой), пластичних та стійких до корозії, у частинах турбін та двигунів;
- Ніобій: фероніобій, який використовується для мікролегування високоміцної конструкційної сталі;
- Скандій: у сплавах AlSc для легких - високоміцних неконструкційних деталей і арматури;
- Титан: сімейство основних сплавів, легше за сплави Al-Mg, висока міцність, для броні, планерів і крил, вентиляторів і компресорів.

Окрім суттєвого дефіциту критичної сировини на ринку ЄС, виробники БПЛА додатково стикаються з екологічними обмеженнями та необхідністю

розробки складного еко-дизайну для ефективного вторинного використання і заміни дефіцитних матеріалів.

Розподіл ланцюгів постачання критичної сировини для виготовлення БПЛА за країнами світу наведено на рис. 2.25.

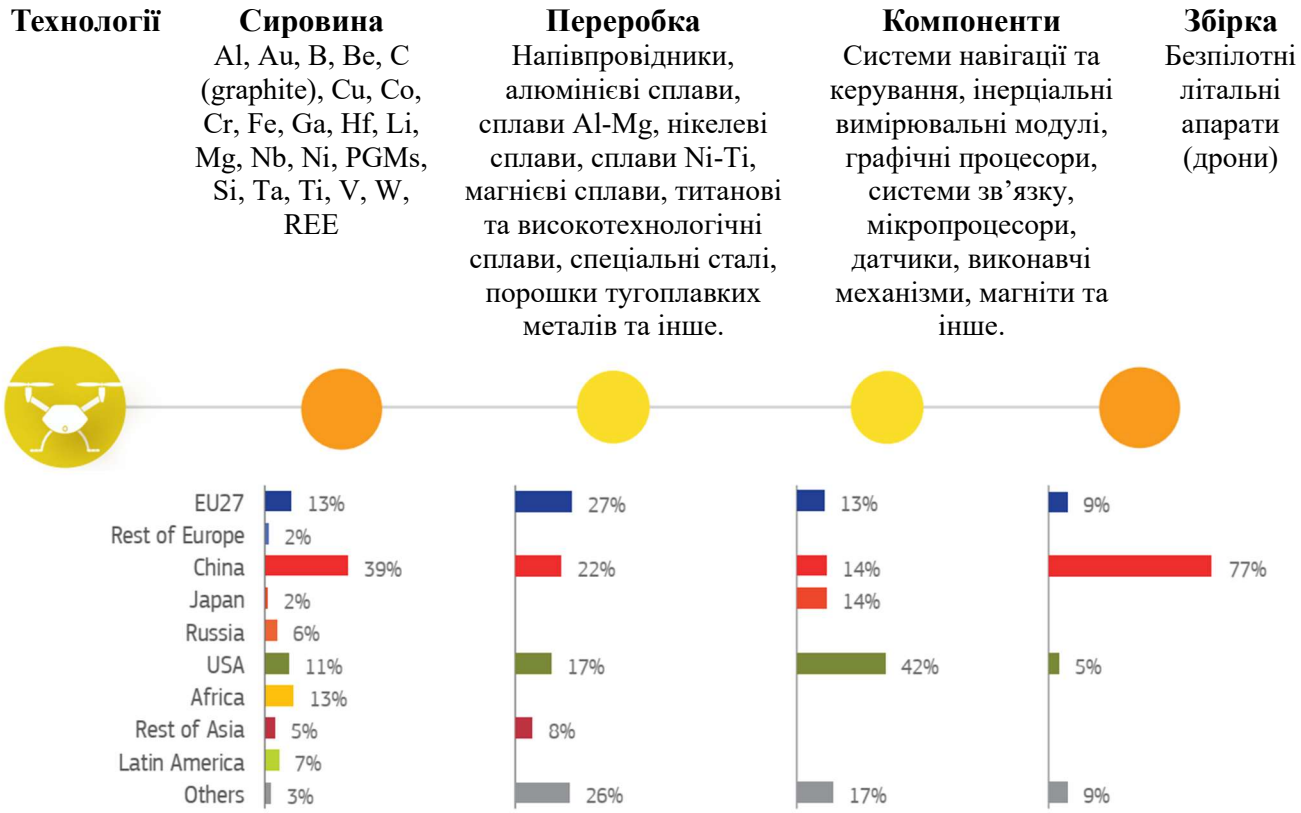


Рисунок 2.25. – Доля країн світу в постачанні критичних матеріалів і виготовленні компонентів для виготовлення БПЛА [2]

При виготовленні БПЛА важливо враховувати їх призначення та зростання попиту за конкретним призначенням.

Для оборонного комплексу використовуються дрони, переважно малі/тактичні, а їх частка становлять майже 10% від військових авіаційних активів сьогодні. Нові місії пропонують можливості для подальшого зростання сфери застосування протягом багатьох років. Прогнозується стабільне зростання, що наближається до 5% щорічно, та скорочення пілотованого флоту, що становитиме 35% майбутнього флоту у 2050 році.

Комерційний напрям використання БПЛА свідчить про швидке зростання попиту з місіями VLOS (Visual Line of Sight – це режим польоту безпілотника, за

якого оператор повинен постійно бачити БПЛА неозброєним оком) для гірничодобувної промисловості, розваг, інспекції комунальних послуг. Швидке зростання прогнозується до 2035 року, враховуючи високий потенціал у сферах сільського господарства, доставки та громадської безпеки. При цьому очікується поступова еволюція безпілотної авіації в даному напрямку.

Використання БПЛА у сфері відпочинку призвело до швидкого розповсюдження дронів (аналогічно розповсюдженню камер GoPro). Очікується ще 2-5 років подальшого зростання, перш ніж ринок досягне продажів мільйону одиниць на рік. Загальна кількість одиниць БПЛА в світі на 2026 рік вже перевищила десятки мільйонів одиниць.

Для забезпечення мінеральною сировиною галузі безпілотних літаючих апаратів розроблено перелік рекомендацій щодо поводження з ресурсами в межах ЄС.

Відповідно до технологічного процесу виготовлення БПЛА на сьогодні з 48 сировинних матеріалів лише 15 позначені як критичні для економіки ЄС. До них відноситься кобальт, літій, титан, кремній, природний графіт, магній, ванадій, сурма, вісмут, борати, індій, галій, вольфрам, тантал, ніобій, берилій і гафній, а також групи матеріалів РЗЕ та МПГ.

Запровадження широкої диверсифікації поставок матеріалів допоможе знизити ризики постачання сировини. Оскільки більше 50% критичних ресурсів постачається численними невеликими країнами це забезпечує хороші можливості для диверсифікації поставок

Сприяння науково-дослідним розробкам, розвитку навичок та компетенцій в галузі отримання ключових стратегічних компонентів, вузлів і деяких більших військових БПЛА, що дозволить зменшити залежність ЄС від імпорту, а також упорядкувати військові закупівлі у ЄС для підвищення ефективності та швидкості впровадження рішень.

Необхідно сприяти міжнародному співробітництву та стандартизації у виробництві БПЛА, що посилить позиції ЄС як потужного постачальника дронів у світі.

2.9. Адитивні технології (3-Д друк)

Адитивні технології стрімко розвиваються, відкриваючи перспективи для створення надміцних біоімплантів, деталей аерокосмічної галузі та автоматизованого будівництва на землі та космічних об'єктах. Майбутнє 3D-друку тісно пов'язане з переходом на цифрові безвідходні фабрики, що дозволить радикально скоротити ланцюжки постачання та спростити виробництво.

Проте масштабування галузі критично залежить від стабільного постачання рідкісноземельних елементів, титану, кобальту та нікелю, які використовуються для виробництва високотехнологічних металевих порошків (рис. 2.26).

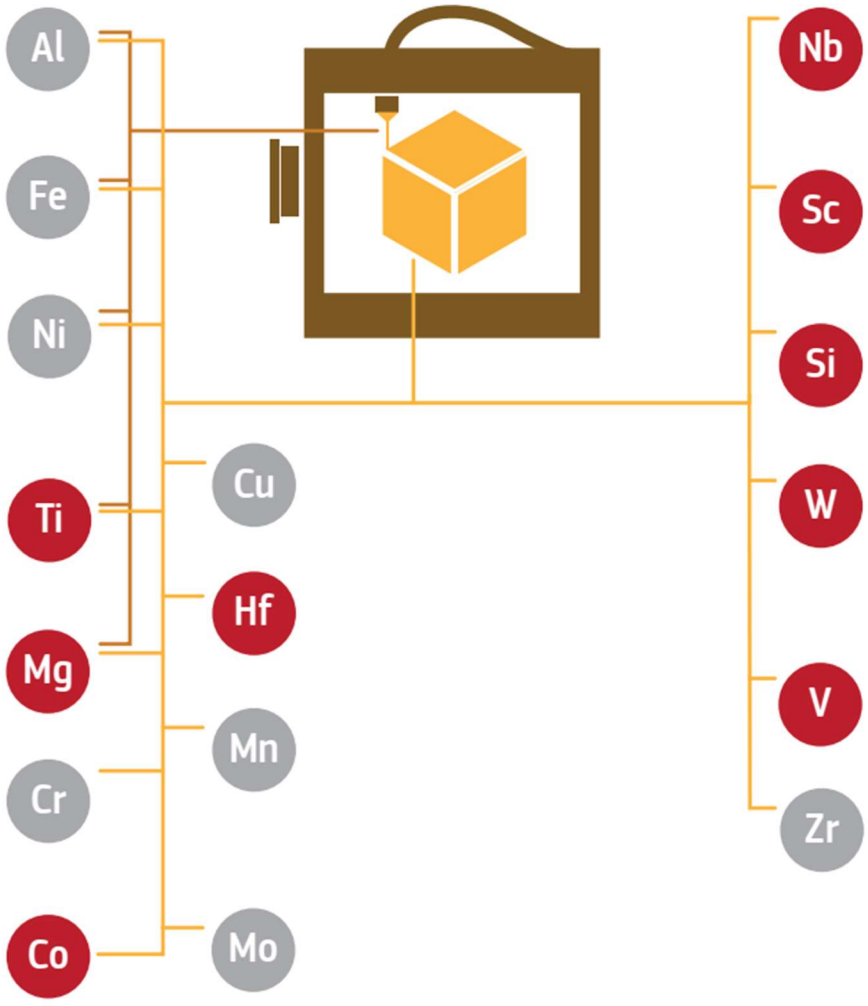


Рисунок 2.26 – Використання критичної мінеральної сировини у адитивних технологіях [2]

Технології адитивного виробництва вимагають значної кількості критичної сировини для виготовлення інструментів друку, а також як витратного матеріалу (рис. 2.26). Нижче наведено основне призначення критичних металів у технологіях адитивного виробництва:

- Алюміній: основна сім'я сплавів, що використовуються в 3D друку для аеро-космічних приладів, інтер'єрів салонів;
- Нікель: для сплавів Ni та Ni-Ti (серія Hastelloy), пластичних та стійких до корозії, у частинах турбін та двигунів;
- Титан: сімейство основних сплавів, легше за сплави Al-Mg, висока міцність, для аерокосмічної та медичної промисловості;
- Магній: у високоефективних сплавах Al-Mg;
- Хром: стійкий до корозії в CoCr сплавах, газових турбінах, двигунах, стоматології та медицині;
- Кобальт: у різних суперсплавах, CoCr, у газових турбінах, двигунах, стоматології та медицині;
- Мідь: легуючий елемент у Ni та суперсплавах;
- Гафній: суперсплави на основі Ni, висока міцність-висока температура виробів;
- Марганець: як легуючий елемент у різних сплавах Ni;
- Молібден: легуючий елемент у різних Ti-сплавах, додає міцності;
- Ніобій: у суперсплавах, сплавах Ti-Al-Nb, у двигунах, лопатях, клапанах, роторах;
- Скандій: для легких високоміцних деталей і арматури;
- Кремній: як легуючий елемент у легких сплавах Al-Mg;
- Ванадій: легуючий елемент у різних сплавах Ti-Al;
- Вольфрам: у різних жаростійких суперсплавах, у нержавіючих та гартованих інструментальних сталях, лопатках і лопатках турбін;
- Цирконій: елемент у Ti-сплавах, у Bulk Metallic Glass, зірочках, пружинах, шестернях, датчиках.

Аналіз ринків постачання критичної сировини для технологій адитивного виробництва наведено на рис. 2.27.

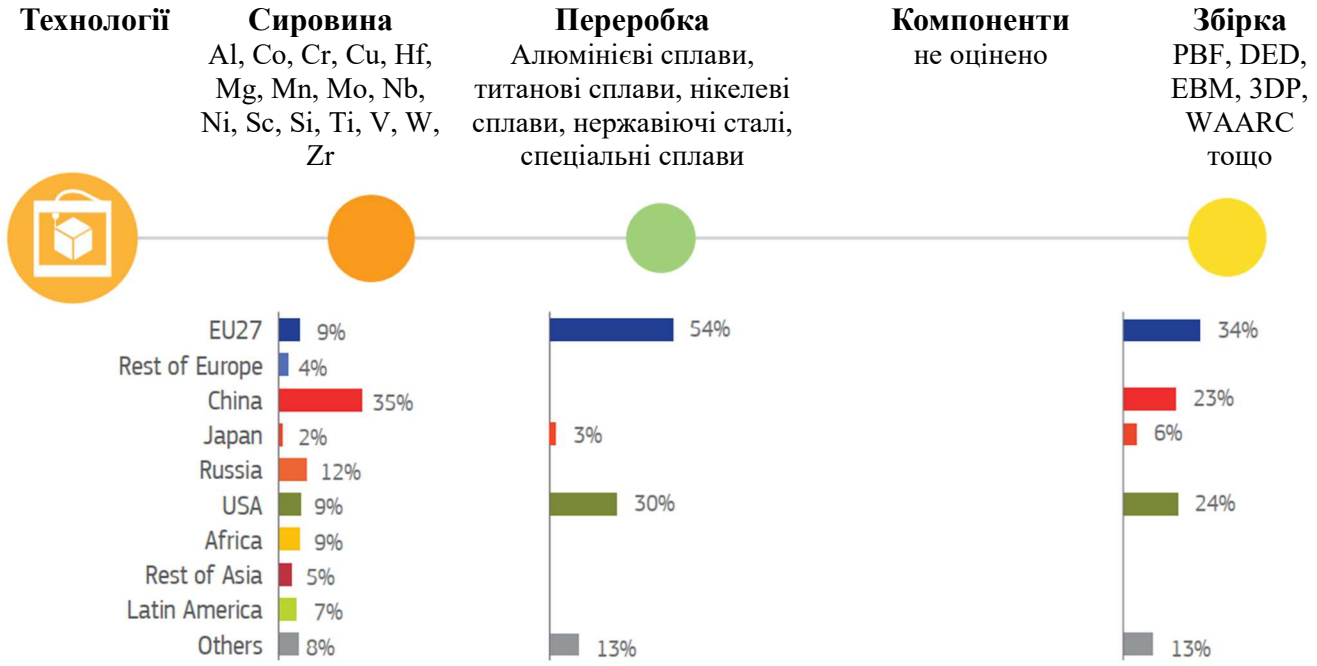


Рисунок 2.27. – Доля країн світу в постачанні критичних матеріалів і виготовленні компонентів для адитивного виробництва [2]

Геополітична конкуренція за доступ до критичних мінералів та монополізація їх видобутку окремими країнами (рис. 2.27) створюють суттєві ризики для стабільності світового ринку адитивного виробництва. Через це головними векторами розвитку технологій стають розробка нових композитних матеріалів, ефективний ресайклінг порошків та мінімізація використання дефіцитної сировини.

За прогнозними оцінками [2] світовий ринок адитивного виробництва до 2035 року може сягнути 350 млрд USD, що включатиме друк полімерними і металевими матеріалами.

Таке стрімке зростання масштабів адитивного виробництва пояснюється основними перевагами 3D-друку для різних секторів виробництва. За рахунок функціональності технологій виникає можливість скорочення, заміни, переробки та пом’якшення використання сировини та традиційно виготовлених деталей і компонентів.

Очікується, що ринок виробництва деталей суттєво зростатиме від 15% до 30% протягом наступних кількох років, а на аерокосмічну, автомобільну та медичну промисловість припадатиме 51% ринку 3D-друку.

Відповідно до даних на (рис. 2.27) ЄС є основним постачальником оброблених матеріалів, необхідних для технології 3D-друку, з часткою поставок близько 54%. За нею йдуть США (30%), Канада (9%), Японія (3%) та інші менші постачальники, які постачають решту 4%.

У той же час, адитивне виробництво в ЄС також потребує налагоджених ланцюгів поставок критичної мінеральної сировини. Для цього розроблено ряд рекомендацій здатних забезпечити частковий доступ до необхідних матеріалів.

Потрібно продовжувати диверсифікацію постачання критичної сировини та укладання торгових угод у галузі виробництва добавок у ЄС. Зокрема, подальшої уваги заслуговують зусилля щодо забезпечення постачання титану та стратегічних другорядних елементів, що використовуються в спеціальних сплавах, таких як скандій та ніобій.

Варто враховувати, що залежність ЄС від сировини виходить за межі фізичного доступу до окремих корисних копалин. Рекомендується додатково проаналізувати конкретні економічні фактори, пов’язані з умовами видобутку, торговельними обмеженнями, екологічними дозволами та іншими неоднорідними умовами. Цільові інвестиції в дослідження і розробки 3D-друку розширять можливості, пов’язані з мобільністю, стійкістю, ремонтом і обслуговуванням. Щоб не відставати від темпів розвитку США та Китаю, потрібні додаткові інвестиції.

Значну увагу необхідно приділити переробці та повторному використанню ресурсів. Рекомендується додатково проаналізувати можливості переробки компонентів 3D-друку, а також переробки порошків, які не використовуються у виробництві. Особливої уваги потребує наявність більш рідкісних компонентів та сумішей.

Для розвитку конкурентоспроможної екосистеми 3D-друку в ЄС необхідно активізувати науково-дослідні роботи, зокрема у сфері вивчення алюмінієво-

магнієвих і титанових сплавів. Інвестиції в дослідження допоможуть опанувати точний зв'язок між рецептурами металевих порошків та різними технологіями виробництва. Водночас існує гостра потреба у стандартизації сировини та сертифікації готових компонентів, що є критично важливим для суворих вимог безпеки в аерокосмічній галузі.

2.10. Цифрові технології

Цифрові технології трансформують світ із безпрецедентною швидкістю, докорінно змінюючи процеси комунікації, життя та праці. Прагнучи досягти технологічного суверенітету в критичних сферах (блокчейн, квантові обчислення, обмін даними), ЄС водночас впроваджує широку цифровізацію для підвищення продуктивності промисловості.

Завдяки «Інтернету речей» (IoT), автономні транспортні засоби, підключені роботи та сенсори стають невіддільною частиною індустріальних ланцюжків доданої вартості. Проте масштабний розвиток передової електроніки та ІКТ-пристроїв вкрай залежить від постачання критичної мінеральної сировини (рис. 2.28).



Рисунок 2.28. – Цифрові технології від яких залежить розвиток суспільства в найближчій перспективі [2]

Наразі залежність Європи від іноземних цифрових компонентів лише зростає, про що свідчить значний дефіцит торговельного балансу у сфері високотехнологічної продукції, зумовлений масштабним імпортом з Китаю.

Головними матеріально-сировинними особливостями цифрової індустрії ІКТ є використання постійно зростаючого спектра хімічних елементів для забезпечення специфічних властивостей пристроїв, а також колосальні обсяги виробництва самих мікросхем і гаджетів (рис. 2.29). Обсяги залучення критичної мінеральної сировини вказані в тоннах, а для виготовлення різних типів пам'яті в зетабайтах (1 ЗБ = 1012 гігабайт).

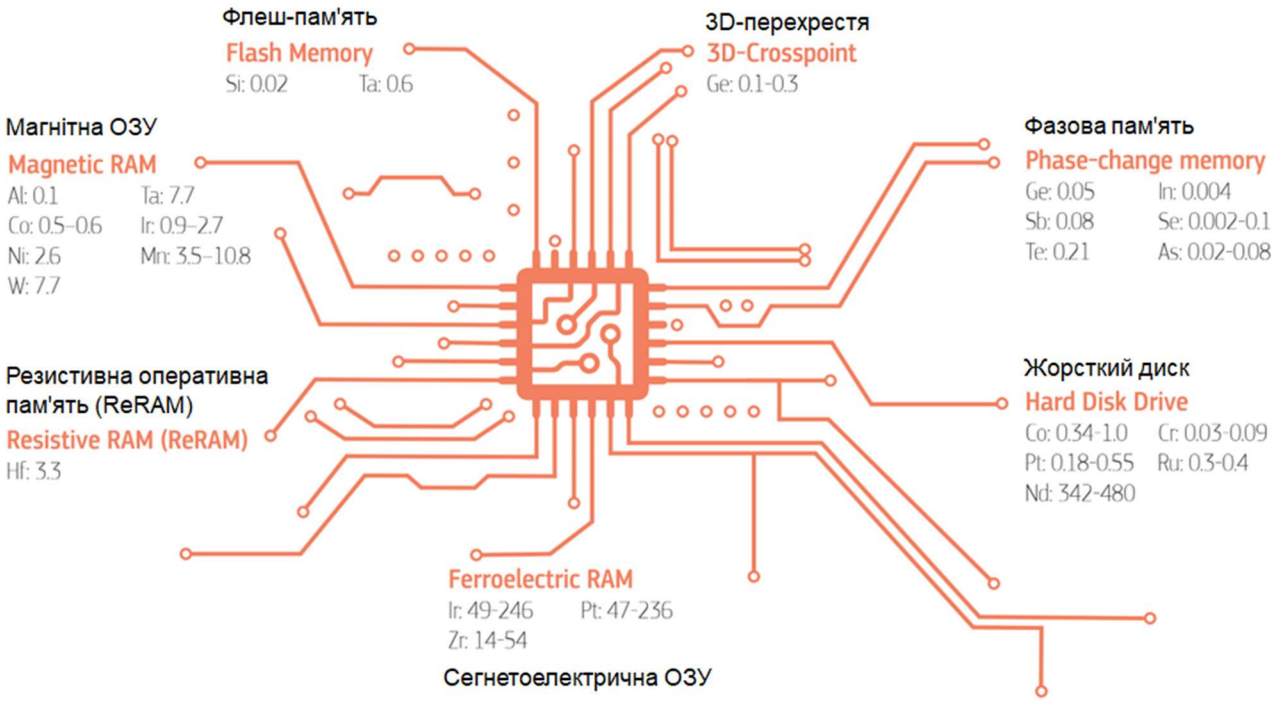


Рисунок 2.29. – Залежність цифрових технологій від критичної мінеральної сировини при виготовленні різних типів пам'яті [2]

Інші види сировини, які не входять безпосередньо до складу ІКТ-обладнання, є не менш важливими для його належного функціонування та можуть стати критичними для впровадження комп'ютерних технологій наступного покоління. Наприклад, гелій є незамінним для створення наднизьких температур, близьких до абсолютного нуля, що критично необхідно для квантових обчислень, надпровідників та напівпровідників.

Приклад залучення критичної мінеральної сировини при виготовленні гаджетів, смартфонів, ноутбуків і ПК у розрізі прогнозного зростання попиту до 2035 року наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. - Показники значущості CRM для смартфонів, ноутбуків і настільних ПК [2]

CRM	A. Use in 2015 (t)	B. EU apparent consumption* (t)	% (A/B)	C. Use in 2035 (t)	% (C/B)	Notes
Pd	7	60	12%	10	17%	Використання паладію в електроніці пов'язане з виробництвом деяких друкованих плат і в багатошарових керамічних конденсаторах (в мобільних телефонах)
Ga	4	80	5%	5	6%	Основне використання галію в електроніці - це напівпровідники для інтегральних схем. Зокрема, Ga використовується в підсилювачах потужності (PA), які використовуються в стільникових телефонах для посилення сигналів, як голосу, так і даних. Чим сучасніше покоління використовується (3G, 4G, 5G), тим більше PA потрібно.
Ta	80	100	80%	110	110%	Основне застосування танталу — спеціальні конденсатори, що характеризуються високою ємністю, малими розмірами та високою продуктивністю. Тонкі шари танталу також використовуються в інтегральних схемах.
Nd	90	1 000	9%	120	12%	Основним застосуванням неодиму є постійні магніти NdFeB, які використовуються у жорстких дисках
Dy	9	180	5%	12	7%	Основне використання диспрозію в постійних магнітах NdFeB для підвищення стійкості магніту довисокі температури

*загальне споживання

Цифровізація супроводжуватиметься стабільним зростанням продажів смартфонів у ЄС зі 130 мільйонів одиниць у 2018 році до 180 мільйонів у 2035 році, тоді як попит на комп'ютери залишиться стабільним (табл. 2.1). При цьому тенденції споживання критичної сировини (CRMs) суттєво відрізнятимуться: використання паладію, галію, диспрозію та неодиму зростатиме помірно або стагнуватиме через технологічні зміни.

Особливо критичною є ситуація з танталом, оскільки обсяги його залучення суто в електронній індустрії майбутнього можуть перевищити весь поточний рівень його споживання всіма галузями Євросоюзу разом взятими.

Критична мінеральна сировина, що використовується при виготовленні смартфонів, ноутбуків і настільних ПК наведена (рис. 2.30).

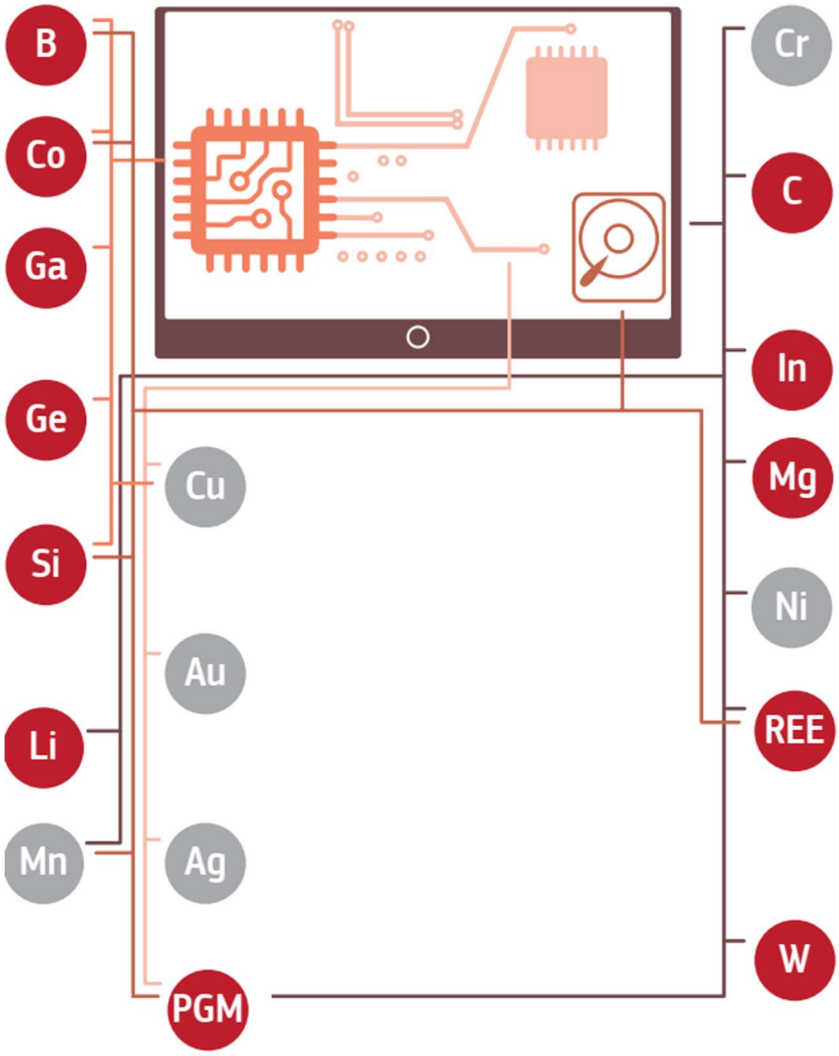


Рисунок 2.30 – Використання критичної мінеральної сировини у цифрових технологіях [2]

Призначення кожного з видів критичної мінеральної сировини у інформаційних технологіях наведено нижче:

- Бор: у напівпровідниках і постійних магнітах HDD;
- Кобальт: у жорстких дисках, напівпровідниках та інтегральних схемах;
- Галій: у GaAs для напівпровідників, світлодіодів, напівпровідників GaN для Blu-ray, мобільних телефонів;
- Германій: скло для волоконно-оптичних кабелів, інфрачервона оптика (нічне бачення), у напівпровідниках;
- Кремній: кремній для електроніки в напівпровідниках, SSD та мікроелектроніці;

- Літієві: первинні батареї;
- Марганець: у технологіях зберігання пам’яті та акумуляторах;
- Мідь: основний провідник в електроніці, з’єднувачі, друковані схеми, електропроводка, контакти, мікросхеми, напівпровідники;
- Золото: роз’єми, перемикачі, контакти реле, паяні з’єднання, з’єднувальні дроти та смуги, мікросхеми пам’яті та друковані плати;
- Срібло: сплави для паяння, електричні контакти та друковані плати;
- PGM: Pd для багатошарових керамічних конденсаторів, мікросхем і друкованих плат. Pt та інші PGM знаходяться у склі для дисплеїв та пам’яті;
- Хром: у нержавіючих сталях, для нанесення покриттів на електронні компоненти, пігменти;
- Графіт: для виробництва графену, електро- та теплопровідного матеріалу, призначеного для багатьох застосувань;
- Індій: в ситах як оксид індію;
- Магній: у високоефективних сплавах Al-Mg;
- Нікель: у нержавіючих сталях, для покриття та антикорозійних покриттів;
- Рідкісноземельні елементи: багато LREE та HREE у різних застосуваннях, у т.ч. магніти, HDD, дисплеї, LED, лазери, друковані плати, пам’ять.;
- Вольфрам: термостійкий в мікросхемах, діелектричних матеріалах і транзисторах.

Аналіз світових виробників критичних матеріалів та компонентів при виготовленні цифрових технологій наведено на рис. 2.31.

Для забезпечення доступу компаній ЄС до критичної мінеральної сировини, розроблено ряд рекомендації щодо отримання необхідної сировини при виготовлені цифрових технологій оскільки вони є стратегічними і не тільки підтримують величезний цифровий сектор, але також дозволяють функціонувати технологіям з інших секторів економіки.

Технології	Сировина	Переробка	Компоненти	Збірка
	Ag, Au, B, C (graphite), Co, Cr, Си, Fe, Ga, Ge, In, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, PGMs, REE, Si, Sn, Sr, Ti,W	не оцінено	не оцінено	не оцінено

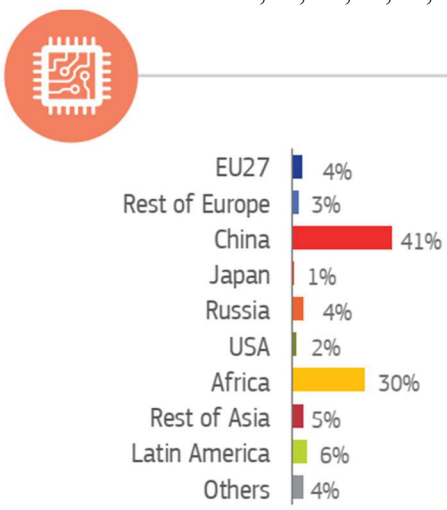


Рисунок 2.31. – Доля країн світу в постачанні критичних матеріалів і виготовленні компонентів для цифрових технологій [2]

Оскільки питання забезпечення цифрових технологій критичною сировиною (рис. 2.31) є складних та багатофакторним воно потребує додаткових досліджень та подальшої роботи. У той же час, аналіз показує, що в ЄС спостерігатися збільшення споживання деяких CRM (паладію, галію, диспрозію та неодиму) для цих технологій.

Питання структурованого аналізу вузьких місць для цифрових технологій потребує додаткових детальних спостережень для розробки рекомендації. Тим не менш, схоже, що ЄС значною мірою залежить від інших країн (головним чином Південно-Східної Азії) щодо високотехнологічних компонентів і агрегатів.

З впевненістю можна констатувати, що провідна роль ЄС полягає у зборі та утилізації відходів електричного й електронного обладнання, а також у стандартизації (також щодо матеріальної ефективності електричного обладнання). Зазначений напрям ресайклінгу може стати активом для отримання нових об’ємів критичної сировини для функціонування сектору цифрових технологій.

Контрольні запитання

1. Які саме критичні метали формують хімічний склад катода й анода в сучасних літій-іонних акумуляторах, і як їхній дефіцит може обмежити розвиток електротранспорту?

2. У чому полягає роль металів платинової групи (МПГ) та інших рідкісних елементів у забезпеченні ефективності роботи паливних елементів і водневої енергетики?

3. Застосування яких рідкісноземельних елементів є незамінним для виготовлення потужних постійних магнітів, що використовуються у вітрогенераторах та тягових двигунах електромобілів?

4. Які специфічні критичні мінерали та напівпровідникові матеріали забезпечують фотоелектричний ефект і високий ККД кремнієвих та тонкоплівкових сонячних електростанцій?

5. Через які конструктивні особливості та компоненти (сенсори, мікросхеми, приводи) сучасна робототехніка має критичну залежність від стабільного постачання напівпровідників?

6. Яка мінеральна сировина та сплави є критично важливими для забезпечення легкості, міцності й електроніки безпілотних літальних апаратів (БПЛА)?

7. Які вимоги висуваються до металевих порошків і композитів на основі КМС в адитивних технологіях (3D-друці) та їхньому застосуванні у цифрових та аерокосмічних галузях?

Список рекомендованої літератури до розділу 2.

1. European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. Джерело: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1

2. European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020.

РОЗДІЛ 3. ВИДОБУТОК МЕТАЛЕВОЇ КРИТИЧНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ

У розділі викладено загальну класифікацію металевої КМС, що дає змогу чітко розрізняти її специфічні категорії залежно від їх фізико-хімічних властивостей і сфери застосування. Освоєний матеріал дозволяє: розуміти технологічні процеси отримання металів від видобутку до збагачення; усвідомлювати геополітичні особливості ринку через монополію Китаю. Також отримані знання дають можливість засвоїти специфіку супутнього вилучення рідкісних металів, наприклад, що понад 90% світового галію отримують як побічний продукт переробки інших металів. Здобувачі зможуть оцінювати мінерально-сировинну базу металевих руд КМС України, володіючи інформацією про вітчизняні родовища, а також методами їх розробки та збагачення.

3.1. Загальна класифікація критичної мінеральної сировини

Критична мінеральна сировина це практично незамінні в технологічних процесах природні ресурси, які розподіляються за специфічними категоріями залежно від їхніх хімічних і фізичних властивостей. Усю критичну мінеральну сировину можна умовно поділити на метали, перехідні, лужні та лужноземельні метали, металоїди, лантаноїди, неметали, благородний газ, мінерали та породи (корисні копалини).

Головний представник базової групи металів це алюміній, який критично важливий для авіабудування, транспортної інфраструктури та виробництва сучасних ліній електропередач.

До групи перехідних металів належать мідь, кобальт, нікель і вольфрам, які є незамінними елементами для виготовлення акумуляторів електромобілів, зеленої енергетики та надміцних військових сплавів.

Літій є найяскравішим представником лужних металів і основою для накопичувачів енергії, тоді як магній і берилій використовуються для полегшення маси конструкційних компонентів в аерокосмічній техніці.

Група металоїдів забезпечує роботу всієї світової напівпровідникової індустрії та виробництво сонячних панелей. Ця критична сировина (кремній, арсен та інші) займають проміжне положення між металами та неметалами.

Рідкісноземельні елементи (лантаноїди), такі як неодим, диспрозій та празеодим, є критичною для створення надпотужних постійних магнітів у вітрових генераторах і сучасній електроніці.

У групі неметалевої критичної сировини особливе місце посідає природний графіт, який використовується як анодний матеріал у літій-іонних батареях, а також є незамінним для металургії.

Група мінералів у критичній сировині виділяється тим, що містить у собі декілька хімічних елементів. До них відносять флюорит (плавиковий шпат) та барит, які є базовими мінеральними сполуками, необхідними для хімічної промисловості, металургії та буріння нафтогазових свердловин.

Частина критичної мінеральної сировини знаходиться у гірничих породах і представлена сумішшю різних хімічних елементів. До таких корисних копалин відносять фосфорити та калійні солі, які виступають фундаментальною основою для виробництва мінеральних добрив, що забезпечують глобальну продовольчу безпеку планети.

Також до критичної сировини відносять гелій, який є благородним газом. Віт має унікальні властивості і без цього газу неможливо охолоджувати магніти у томографах (МРТ), здійснювати запуски космічних ракет та очищувати напівпровідники. Розглянемо походження і технологічні процеси отримання наведених вище критичних мінералів з природних ресурсів.

3.2. Освоєння критичної мінеральної сировини з руд металів

3.2.1. Алюміній

Видобуток бокситів в основному виконується відкритим способом на кар’єрах. При розробці цих родовищ використовується гірнича техніка та вибухові роботи для розпушення бокситових руд. Метою цього процесу є

переміщення або розпушення ущільненого ґрунту, який ускладнює доступ до покладів руди. Після чого екскаватори або навантажувачі знімають верхні шари ґрунту, де розташована більшість бокситових руд.

У якості транспорту на кар'єрах (рис. 3.1) можуть використовуватися конвеєри або автосамоскиди, що забезпечують переміщення руд на збагачувальну фабрику.



Рисунок 3.1. – Видобуток бокситових руд відкритим способом [1]

На деяких кар'єрах встановлюють дробарки для зменшення фракційності гірничої маси відповідно до вимог транспортування. Після потрапляння корисної копалини на збагачувальний комбінат, бокситові руди готують до подальшої переробки, що передбачає суто вилучення сполуки глинозему з руди. Це робиться за допомогою процесу Холла-Еру (також відомого як плавлення) і процесу Байєра. У ньому техніка очищення зосереджена на зборі оксиду алюмінію або глинозему з руди (рис. 3.2).

Це гідрометалургійна технологія, при якій подрібнені руди розчиняють у їдкому розчині або їдкому натрії при високих температурах. В результаті цього

видаляються інші небажані матеріали з руди (оксиди заліза, кристали та інші агрегати) і створюється розчин алюмінату натрію.



Рисунок 3.2. – Склади бокситової руди [2]

Під час процесу Холла-Еру застосовується техніка плавлення під час якої руди змішуються з фторидом кальцію або гексафторидом алюмінію натрію, який потім відкладає чистий алюміній. Це створює електролітичну реакцію за участю катода та анода. Металевий алюміній буде осідати на катоді в кінці процесу, тоді як водень буде осідати на аноді.

Ресурсний потенціал алюмінієвої промисловості України формують поклади бокситів, алунітів та нефелінових руд. Водночас запаси бокситів у державі є вкрай обмеженими, адже розвідано всього три такі об’єкти: Високопільське, Нікопольське та Смілянське родовища.

На сьогодні державним балансом корисних копалин враховано два масштабні джерела алунітової сировини на Закарпатті – Біганське та Берегівське родовища, розвідані обсяги руди яких становлять 290,3 та 51,4 мільйона тонн відповідно. Загалом у межах Берегівського рудного району зафіксовано майже десять родовищ та рудопроявів алунітів, приурочених до вторинних кварцитів.

Попри можливість розробки алунітових покладів доступним відкритим методом, їхньою суттєвою вадою є низька концентрація корисної речовини

(близько 30%). Це зумовлює значні додаткові капіталовкладення в обов'язкові процеси збагачення.

Для оцінки технологічних перспектив Біганського родовища фахівці провели попередні тести щодо флотаційного збагачення його сумарної рудної проби. Експериментальним шляхом вдалося виділити концентрат із часткою алуніту 51,5–55,0% за умови його загального вилучення на рівні 88,8–91,7%.

Подальші дослідження дозволили детально вивчити особливості флотації окремих різновидів алунітової сировини цього ж родовища. Завдяки оптимізації процесів збагачення показник вмісту оксиду алюмінію в отриманому концентраті зріс із початкових 13–15% до підсумкових 27–28% (залежно від мінерального типу вихідної руди).

3.2.2. Галій

Галій зустрічається в невеликих концентраціях в рудах та інших металах і широко доступний у всьому світі. Але надлишок первинного галію з 2012 до 2017 р. відносно попиту припинив значну частину світового виробництва за межами Китаю, що майже дозволило Пекіну створити монополію. А внутрішні державні субсидії, прямі та непрямі, для виробництва галію дозволили Пекіну усунути будь-яких потенційних конкурентів (рис. 3.3).



Рисунок 3.3. – Видобуток критичних мінералів компанією Chalco [3]

Відповідно до річного звіту, компанії Chalco (Китай) виробництво галію, відбувається як другорядного металу, що використовується в напівпровідниках для електронної та телекомунікаційної галузей (36 тонн у 2018 році). Компанія виробляє галій як побічний продукт глинозему, речовини, яка використовується для виробництва алюмінію.

Попри відносну поширеність галію у природі, його видобуток у більшості випадків є економічно недоцільним, хоча лише в бокситових покладах його розвідані запаси сягають мільярда кілограмів. Саме через низьку рентабельність первинного вилучення значна частина цього металу отримується шляхом вторинної переробки (рис. 3.4).



Рисунок 3.4. – Видобуток галію у Мозамбіку за проєктом НеоТерра [4]

Основними первинними джерелами галію є боксити та нефелінові сієніти, з яких він вилучається як супутній компонент під час переробки на алюміній, а також цинкові концентрати, де він видобувається разом із цинком. Крім того, цей елемент, як і германій, присутній у покладах кам’яного вугілля. У процесах термічної газифікації чи скраплення вугільного палива галій разом із германієм накопичується у золі-виносі. Як наслідок, понад 90% усього світового галію виробляють як побічний продукт із промислових відходів алюмінієвих та цинкових підприємств.

Безпосереднє виділення металу здійснюють двома основними методами: електролізом лужного розчину галату натрію або шляхом сорбційного очищення в іонообмінних колонах із подальшим вилученням цільового елемента з концентрованого розчину через цементацію на алюмінієвій галамі.

Україна займає 2 місце у світі за виробництвом галію. Загальний об'єм виробництва 9 тонн, що складає 2,9% від світового видобутку (після Китаю). В Україні його отримують у Кіровоградській області. Сировиною для його видобування є боксити (середній вміст в бокситах близько 50 г/т), які імпортуються з Африки, Латинської Америки, Австралії.

3.2.3. Вісмут

Завдяки унікальному поєднанню низької теплопровідності та виражених діамагнітних властивостей вісмут є незамінним у металургійній промисловості. Його застосовують для створення легкоплавких сплавів у поєднанні зі свинцем, оловом і кадмієм, а також у процесах виробництва високоточних ливарних форм та штампувального інструменту.

На сьогодні у світі більшість вісмуту виробляється на шахтах Китаю, Мексики як супутня сировина. Є лише одна шахта в Болівії де вісмут розробляється як основна корисна копалина. В інших країнах вісмут є побічним продуктом видобутку інших металів (рис. 3.5).



Рисунок 3.5. – Видобуток вісмуту на ГЗК Нуї-Фао, В'єтнам [5]

Вісмут (рис. 3.6) є металом помірної ціни, він коштує дорожче, ніж мідь, свинець і цинк, але набагато дешевше, ніж золото чи срібло. Крім того, важлива частина світового виробництва вісмуту складається з невеликих кількостей цього мінералу в рудах інших металів, які видобуваються в Бельгії та Японії з імпортних руд, які відправляються в ці країни для плавлення. Для прикладу, Сполучені Штати виробляють невелику кількість вісмуту шляхом переробки. Однак ці об'єми становить менше 5% від загального споживання в США.



Рисунок 3.6. – Загальний вигляд порід, що містять вісмут [6]

Технології отримання вісмуту засновані на переробці поліметалевих мідних та свинцевих концентратів та вісмутових руд методами пірометалургії та гідрометалургії. При вилученні вісмуту з сульфідних сполук, одержуваних при попутній переробці мідних концентратів, використовують плавку осаду з залізним скрапом і флюсом.

У разі використання окислених руд вісмут відновлюють вуглецем під шаром легкоплавкого флюсу при температурах 900-1000 °С. Також замість вуглецю може бути використаний сульфіт натрію, який відновлює оксид вісмуту при температурі 800 °С

Отримання вісмуту з чорнового свинцю, який утворюється під час переробки свинцевих концентратів, полягає у виділенні вісмуту за допомогою магнію або кальцію.

Гідрометалургійний спосіб отримання вісмуту характеризується вищими економічними показниками та чистотою отриманого продукту при переробці бідних поліметалевих концентратів.

На сьогодні Україна імпортує весь обсяг вісмуту з Казахстану, оскільки не має розробленої власної сировинної бази для покриття внутрішніх потреб промисловості, що становлять 8–8,5 тонн на рік. Проте держава володіє значним ресурсним потенціалом для організації власного видобутку.

Зокрема, у золоторудних покладах Українського щита зафіксовано вісмутову мінералізацію, представлену самородною формою металу, вісмутином, мальдонітом і телуридами вісмуту, які в майбутньому можна вилучати як супутні компоненти.

Крім того, перспективні миш'яково-вісмутові та нікель-кобальт-вісмутові рудопрояви виявлено серед рідкіснометалевих об'єктів Волині й Середнього Побужжя, молібденових зон Сущано-Пержанської структури, а також на території Східного Приазов'я.

3.3. Видобуток критичної мінеральної сировини з руд перехідних металів

3.3.1. Ванадій

Технологія видобутку та збагачення ванадію має унікальний характер, оскільки цей метал є класичним розсіяним елементом. Він практично не утворює власних великих родовищ, а вилучається як попутний компонент із комплексних руд з переважно титаномагнетитових (залізних), а також фосфоритів, бокситів, уранових руд та нафтових бітумів.

Видобування ванадійвмісних титаномагнетитових руд здійснюється класичними гірничими способами: відкритим і підземним. Відкритий спосіб застосовується для більшості великих родовищ (рис. 3.7), у той час як підземний

спосіб використовується рідше, коли рудні тіла залягають на великій глибині. Для бідних або специфічних ураново-ванадієвих руд іноді застосовують метод підземного хімічного вилуговування.



Рисунок 3.7. – Розробка родовищ руд, що містять ванадій з використанням відкритого способу [7]

На території України промислові концентрації ванадію зосереджені у складі ільменіту апатит-ільменітових родовищ (як корінних, так і пов'язаних із корами вивітрювання), в ільменітових розсипних покладах, у корінних уран-ванадій-скандієвих рудах, а також у бурих залізняках Керченського басейну.

3.3.2. Вольфрам

Видобуток і збагачення вольфраму передбачає комплексний і високотехнологічний процес, який обумовлений дуже низьким вмістом корисного металу в руді (зазвичай від 0,1% до 1-2% WO_3). Промислове значення мають два основні мінерали вольфраму: вольфраміт (Fe, Mn)WO_4 та шеєліт

$CaWO_4$. Оскільки вони мають суттєві відмінності у фізико-хімічних властивостях, технології їхнього збагачення кардинально різняться.

Видобуток руди з вольфрамових родовищ здійснюється двома класичними способами: відкритим і підземним. Відкритий спосіб ефективний при розробці великих штокверкових родовищ, скарнових покладів та розсипів (рис. 3.8). Руда видобувається за допомогою буровибухових робіт та вивозиться самоскидами на збагачувальну фабрику.



Рисунок 3.8. – Розробка родовищ вольфрамових руд [8]

Підземний спосіб використовується для відпрацювання глибоких рудних жил та скарнових тіл. При цьому на практиці застосовують системи з пошаровим обваленням або закладанням виробленого простору підземних виробок.

Технологія збагачення вольфрамових руд є вкрай складною через низьку початкову концентрацію. У цьому випадку першочерговим завданням збагачувальних фабрик є отримання кондиційного концентрату із вмістом 55–65% WO_3.

Процес ділиться на підготовчий етап та основне розділення. Підготовчий етап включає дроблення та подрібнення на кар'єрі та ГЗК. Руду послідовно подрібнюють у щокових і конусних дробарках, а потім у шарових чи стержневих млинах до вивільнення зерен вольфрамових мінералів. В подальшому виконується грохочення та класифікація. Під час цих процесів подрібнений матеріал розділяють за класами крупності за допомогою віброгрохотів та гідроциклонів.

Чорнові концентровані суміші вольфраму часто містять супутні важкі мінерали (сульфіди, каситерит, танталіт). Для отримання чистого вольфрамового концентрату застосовують комплексну доводку. Це може бути сульфідна флотація, магнітна сепарація високої інтенсивності, гідрометалургійне вилуговування.

В Україні перспективні об'єкти вольфрамової мінералізації зафіксовані у межах кількох геологічних структур. Зокрема, до них належать Мангуський прояв у Східному Приазов'ї, Селищанський рудопрояв у структурі Корсунь-Новомиргородського плутону, а також скарнові утворення Пержанського рудного поля та Кочерівської групи проявів поблизу Житомира. Крім того, вольфрамоносна мінералізація, приурочена до гнейсів і кристалосланців, виявлена в Миколаївсько-Камчатській та Жовтянсько-Успенській зонах, а також у скарнах таких об'єктів, як Клинці та Майське.

3.3.3. Гафній

У більшості цирконієвих мінералів міститься від 1-2 до 6-7 % гафнію, а у вторинних мінералах – до 35 %. Найцінніші промислові типи цирконієвих родовищ, що містять значні поклади гафнію це морські і алювіальні розсипи мінералу циркону.

Основним джерелом цирконових (та гафнієвих) руд є родовища важких мінеральних пісків (головним чином в Австралії та Південній Африці), пегматити (зокрема в Бразилії та Малаві). Поведінка цирконію та гафнію в навколишньому середовищі дуже подібна одна до одної, оскільки більшість

мінералів, що містять цирконій та гафній, мають обмежену розчинність та реакційну здатність.

Найвищі концентрації гафнію серед різновидів циркону характерні для альвіту, циртоліту, наегіту та малакону. При цьому відомий лише один мінерал, у структурі якого частка гафнію перевищує вміст цирконію – це тортвейтит (який за своєю основною класифікацією є мінералом скандію).

Технологія видобутку і збагачення гафнію (Hf) є унікальною, оскільки у природі не існує власних гафнієвих родовищ чи окремих гафнієвих мінералів. Гафній це класичний розсіяний елемент, який є постійним «двійником» цирконію через надзвичайну схожість їхніх хімічних властивостей та атомних радіусів.

Весь промисловий гафній отримують виключно як попутні продукти під час переробки та глибокого очищення цирконієвої сировини. Приклад відкритої розробки родовищ, що містять гафній (рис. 3.9)



Рисунок 3.9. – Розробка цирконієвих родовищ [9]

Технологія отримання гафнію передбачає його обов'язкове первинне відокремлення від цирконію. Цей етап реалізують завдяки розбіжностям у розчинності солей обох металів – зокрема, шляхом екстракції нітратів у три-н-бутилфосфаті або тіоціанатів у метилізобутилкетоні. Додатково застосовують методи іонообмінної сорбції або фракційної перегонки їхніх хімічних сполук.

Виділені очищені речовини трансформують у тетрахлорид гафнію $HfCl_4$, який згодом відновлюють до металевого стану за допомогою магнію або натрію. Для одержання металу надвисокої чистоти використовують йодидний метод (газотранспортні реакції): у помірно нагрітій зоні реактора йод взаємодіє з сировиною, а в іншій, високотемпературній зоні, утворений йодид розпадається на розжареній нитці, де й кристалізується чистий гафній.

Україна володіє потужним потенціалом для освоєння цих ресурсів. Свого часу Вільногірський ГМК забезпечував випуск рутилового, ільменітового, цирконового, ставролітового та дистен-силіманітового концентратів. При цьому титанові концентрати (рутиловий та ільменітовий) слугують базою для виплавки титанового шлаку, отримання титанової губки та безпосередньо металевого титану.

Згодом відповідний технологічний комплекс відновили на Кам'янському хімічному заводі, який об'єднав потужності цирконієвого та гафнієвого секторів ДНВП «Цирконій». За п'ятирічний період підприємство знову налагодило випуск гафній-нікелевої лігатури, наростивши обсяги її виробництва з 2,8 тонни у 2015 році до 10,3 тонни у 2018 році, що впритул наблизило завод до його проєктного потенціалу в 12 тонн на рік.

Майданчики цирконієвого виробництва законсервовані. В структурі ДХЗ функціонує цех основного виробництва, центральна заводська лабораторія, енерго-механічна група і енергетичний цех, група по роботі з персоналом, підготовки виробництва і транспортно-господарська група.

Завод спроєктований для забезпечення якісної гафній-нікелевої лігатури на рівні світових стандартів, а результати моніторингу підприємства співпадають на 100% з результатами незалежних іноземних експертів.

3.3.4. Кобальт

Кобальт в основному добувають із мідних або нікелевих руд, а оскільки кобальт зазвичай виробляється як побічний продукт, пропозиція кобальту значною мірою залежить від економічної доцільності видобутку міді та нікелю на певному ринку.

Первинні родовища кобальту є рідкісними, наприклад, ті, що відбуваються в гідротермальних умовах, пов'язаних з ультраосновними породами, типовими для району Бу-Аззер у Марокко. У таких місцях видобувається виключно кобальтова руда, тому для збагачення потребуються менші витрати. В економічно рентабельних родовищах в 1 тонні руди має бути від 1 до 30 кг кобальту, або від 0,1 до 3%.

Видобуток і збагачення кобальту це складний, багатостадійний процес, який у понад 90-95% випадків є попутним. У природі кобальт майже не утворює власних великих родовищ. Головним чином він вилучається як супутній компонент під час переробки мідно-кобальтових (особливо в Центральній Африці) та нікель-кобальтових (сульфідних і латеритних) руд.

Відкритим способом (рис. 3.10) розробляють окиснені мідно-кобальтові руди та нікель-кобальтові латерити (кори вивітрювання).



Рисунок 3.10. – Розробка родовищ мідно-кобальтові руди [10]

Конкретна технологія повністю залежить від генетичного типу руди, а розробка кобальтовмісних руд може здійснюватися відкритим і підземних способом. Відкритий спосіб у даному випадку є найбільш поширеним. Саме так видобувають більшу частину кобальту в Демократичній Республіці Конго, що забезпечує понад 70% світового ринку (рис. 3.11).



Рисунок 3.11. – Розробка кобальтовмісних руд в ДР Конго [11]

У деяких випадках застосовується підземний спосіб розробки. Він ефективний для освоєння глибоких сульфідних мідно-нікелевих руд (наприклад, у Канаді, Австралії).

Основними рудами кобальту є кобальтит, еритрит, глаукодот і скуттерудит (див. вище), але більшість кобальту отримують шляхом відновлення кобальтових побічних продуктів видобутку та виплавки нікелю та міді. Точний метод одержання залежить від складу руди.

На початковому етапі певну частку сульфіду міді піддають випалюванню, після чого шляхом додавання діоксиду кремнію її зв’язують і виводять у шлак. Наступний крок передбачає термічну обробку та прожарювання сировини з нітратом або карбонатом натрію, що дозволяє повністю позбутися залишків сірки. Отримані в результаті оксиди вилуговують сульфатною чи хлоридною

кислотою: завдяки цьому залізо, нікель та кобальт переходять у рідку фазу. Одержаний розчин знову очищають за допомогою гіпохлориту кальцію, що зумовлює осадження кобальту у формі гідроксиду.

В Україні промислові кобальт-нікелеві ресурси зосереджені в межах двох головних регіонів: чотири об'єкти розвідано в Середньому Придністров'ї, а ще шість – на території Середнього Побужжя. Концентрація кобальту в рудних покладах цих родовищ коливається від 0,04% до 0,14%.

Також метал можна знайти у Прутівському родовищі сульфідних мідно-нікелевих руд з вмістом кобальту – 0,022%. Це родовище не може бути цікавим з економічного погляду через високу глибину покладів, тому його часто відносять до рудопрояву.

3.3.5. Марганець

Марганцеві руди зазвичай зустрічаються у великій кількості та в різних формах, включаючи піролюзит, псиломелан і родохрозит. Для видобутку марганцевої руди використовується відкритий (рис. 3.12) або підземний способи розробки, а після чого вони транспортуються на переробні підприємства.

а) б)



Рисунок 3.12. – Розробка марганцевої руди відкритим способом: а – осадові родовища [12]; б – корінні родовища [13]

Для концентрації марганцевої руди використовуються різні методи, такі як гравітаційна сепарація, магнітна сепарація та пінна флотація. Збагачення підвищує вміст марганцю, що робить його придатним для подальшої переробки. Процеси випалу та відновлення зазвичай використовуються для перетворення марганцевих руд у більш бажані форми. Ці процеси передбачають нагрівання руди при високих температурах для видалення домішок і відновлення оксиду марганцю до металевого марганцю.

Електролітичне виробництво марганцю є широко використовуваним методом отримання металевого марганцю високої чистоти. Гідрометалургійні процеси пропонують альтернативний шлях переробки марганцю, особливо для руд з низьким вмістом або складних мінеральних композицій. Для розчинення та вилучення марганцю з руди використовуються такі методи, як вилуговування, екстракція розчинником і осадження (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – Збагачувальна фабрика з виготовлення марганцевої сировини [14]

Україна має значні запаси осадових марганцевих руд, що пояснює потужний комплекс гірничих робіт в Дніпропетровській обл. На розкривних роботах

Покровського ГЗК свого часу було задіяно 9 роторних комплексів безперервної дії з продуктивністю 5-7 тис. м³/рік, 43 крокуючих екскаватора з ківшами ємністю 6-20 м³, 79 екскаваторів типу пряма лопата з ківшами ємністю 5-8 м³, 35 електровоз-поїздів, понад 500 автомобілів.

На частку Покровського ГЗК припадає 70% усього видобутку марганцевої руди в Україні. Підприємство базується на західній частині Нікопольського марганцевого басейну, де розвідані обсяги копалин сягають 429,1 мільйона тонн. Інфраструктура комбінату зазнала змін: якщо у 2000 році розробка велася у 8 кар'єрах, то до 2022 року їхня кількість скоротилася до 5, водночас сумарний потенціал вилучення гірничої маси становить 200 мільйонів кубічних метрів на рік.

Зі свого боку, Марганецький ГЗК здійснює вилучення корисних копалин як відкритим, так і підземним методами, співвідношення яких становить 80% до 20% відповідно. Його ресурсний потенціал спирається на східні площі Нікопольського родовища із запасами руди обсягом 253 мільйони тонн.

Станом на 2000 рік виробничі показники українських ГЗК галузі характеризувалися такими цифрами: фактичні обсяги вилучення сирої руди становили 7,1 мільйона тонн на рік (за проєктної потужності 9,3 мільйона), випуск товарного концентрату досягав 2,28 мільйона тонн (проєктний рівень – 3,92 мільйона), а обсяги виплавки агломерату дорівнювали 0,4 мільйона тонн, що повністю відповідало проєктному потенціалу. Головною товарною номенклатурою підприємств виступає різносортний марганцевий концентрат із часткою металу від 26% до 43% (відповідно до марки продукції). До переліку супутніх корисних компонентів та відходів належать керамзитові глини і шлами збагачення.

Ключовим технологічним етапом підготовки марганцевої сировини є її збагачення, спрямоване на мінімізацію вмісту шкідливих домішок та підвищення якісних показників товарного продукту. Цей процес організовано безпосередньо на потужностях Покровського та Марганецького ГЗК, де сумарно працюють три збагачувальні фабрики, а у структурі Покровського комбінату додатково

функціонує одна агломераційна фабрика. У 2019 році загалом було виготовлено понад 1,2 млн тонн марганцевого концентрату.

3.3.5. Мідь

Більшість міді видобувається у вигляді сульфідів міді з великих кар'єрів у родовищах порфіру, які містять від 0,4 до 1,0% міді. Найвідоміші місця видобутку міді у світі включають Chuquicamata (рис. 3.14), в Чилі, Bingham Canyon Mine, в Юті, Сполучені Штати, і El Chino Mine, Нью-Мексико, США.

Критичність міді обумовлена тим, що її кількість у використанні стабільно зростає, а наявної кількості ледве достатньо, щоб дозволити всім країнам досягти рівня використання розвиненого світу.

Альтернативним джерелом для отримання міді є поліметалічні конкреції, які розташовані в глибинах Тихого океану приблизно на 3000–6500 метрів нижче рівня моря. Ці конкреції містять інші цінні метали, такі як кобальт і нікель.



Рисунок 3.14 – Кар'єр з видобутку міді [15]

Переважна більшість мідних руд є сульфідами. Поширеними рудами є сульфіди халькопірит, борніт і, меншою мірою, ковеліт і халькоцит. Ці руди

містять приблизно до 1% Cu. Тому потрібне збагачення руди, яке починається з подрібнення з подальшою пінною флотацією. Отриманий концентрат в подальшому випалюється. Цей процес дозволяє отримати штейнову мідь, приблизно 50% Cu за вагою, яка очищається електролізом. Залежно від руди, іноді під час електролізу отримують інші метали, включаючи платину та золото.

Крім сульфідів, інше сімейство руд це оксиди. Приблизно 15% світових запасів міді походить із цих оксидів. Процес збагачення оксидів включає екстракцію розчинами сірчаної кислоти з подальшим електролізом. Значним джерелом міді є переробка. Переробка зазвичай починається з певного процесу плавлення в доменній печі.

Україна не має промислових запасів мідних руд, незважаючи на те, що на її території виявлено понад 150 рудопроявів міді. На сьогодні немає відомостей про розвідані та передані на баланс родовища.

До потенційно перспективних міднорудних районів України належать Український щит, Волино-Подільська плита (25 млн. т.), Дніпровсько-Донецька западина (3,2 млн. т.) і складчасті Карпати. На Українському щиті промисловий інтерес становлять мідномікелеві, мідно-колчеданні і залізо-мідні рудопряви.

Первісну групу формує Прутівський рудопрояв, розташований у межах Волинського мегаблоку та просторово пов’язаний із однойменною габроїдною інтрузією. Водночас мідноколчеданне збідніння зафіксоване в метавулканічних товщах зеленокам’яних структур Середньоприднiпровського мегаблоку, тоді як залізо-мідна мінералізація локалізована в метаморфічних комплексах зони Криворізько-Кременчуцького розлому.

Попри те, що промислова розробка власне мідних родовищ в Україні наразі не ведеться, щорічні обсяги виробництва цього металу сягають 12,8 тис. тонн. Головний внесок у структуру вітчизняного мідного виробництва забезпечують такі підприємства, як Запорізький завод кольорових сплавів, Артемівський завод з обробки кольорових металів, а також потужності «Укркольорпрому» та «Укрчормету».

3.3.6. Нікель

Виготовлення нікелю це капіталомісткий промисловий процес, який кардинально відрізняється залежно від типу руди. У природі комерційне значення мають два основні типи нікелевих родовищ: сульфідні мідно-нікелеві (забезпечують простіший видобуток і високу якість) та силікатні латеритні (становлять понад 60–70% світових запасів, але важчі в переробці).

Конкретний вибір технології освоєння цілком залежить від мінерального складу сировини і може включати відкритий або підземний способи. Видобуток нікелевих руд на кар'єрах застосовується для латеритних руд, які залягають близько до поверхні (кори вивітрювання в тропічних регіонах, наприклад, Індонезія, Філіппіни, Нова Каледонія). Для цього використовують звичайні екскаватори та самоскиди з підготовкою гірничої маси буропідривним способом (рис. 3.15).

Підземний спосіб використовується переважно для глибоких сульфідних руд (Канада та Австралія). Рудні тіла розробляють за допомогою буропідривних робіт із подальшим закладанням виробленого простору.



Рисунок 3.15 – Розробка нікелевої руди відкритим способом [16]

Нікель отримують за допомогою металургії після того як його видобувають із руди. При цьому застосовуються звичайні процеси випалу та відновлення, які дають отримати метал із чистотою понад 75%. Цієї чистоти вистачає для використання без додаткового очищення, залежно від домішок.

Традиційно більшість сульфідних руд переробляють за допомогою пірометалургійних технологій для отримання штейну для подальшого рафінування. Більшість сульфідних родовищ традиційно дозволяють отримувати концентрат за допомогою процесу пінної флотації з подальшим пірометалургійним вилученням.

У гідрометалургійних процесах сульфідні нікелеві руди концентрують за допомогою флотації, а потім плавлять. Спочатку видаляють мідь шляхом додавання сірководню, залишаючи концентрат кобальту та нікелю. Потім використовується екстракція розчинником для розділення кобальту та нікелю з кінцевим вмістом нікелю понад 86%.

В Україні власна мінерально-сировинна база нікелю представлена родовищами силікатного нікелю. Силікатні руди цих родовищ характеризуються низьким вмістом нікелю (0,38-1,24 %) та придатні для виплавки феронікелю.

Основним переробником нікелевої сировини в Україні є Побузький феронікелевий комбінат (ПФК), який тривалий час функціонував на базі імпортних руд; зокрема, у 2020 році обсяг ввезення такої сировини в країну становив 1,6 млн тонн. Власна мінерально-сыровинна база представлена промисловими екзогенними родовищами нікелевих та залізо-нікелевих руд, що генетично пов’язані з корами вивітрювання докембрійських (переважно архейських) ультраосновних масивів. Усі розвідані об’єкти територіально зосереджені в межах двох геологічних структур Українського щита – на Побужжі та в Середньопридніпровському мегаблоці.

Побузький рудний район об’єднує 6 родовищ, серед яких найбільшим є Тернуватське. Промислова рудоносна кора вивітрювання на цьому об’єкті має середню потужність 15 метрів за середнього вмісту корисного компонента (нікелю) 0,91%. З огляду на загальні обсяги запасів рудної маси, які оцінюються

в 1,7 млн тонн, Тернуватське родовище за міжнародною класифікацією відносять до категорії середніх за масштабом.

3.3.7. Ніобій

Ніобій в основному видобувають як основний продукт. Приповерхневі родовища ніобію зазвичай розробляються відкритим способом (рис. 3.16), який передбачає видалення розкривних порід, екскавацію або підривання руди з подальшим вивезенням її на збагачувальну фабрику.



Рисунок 3.16 – Розробка ніобієвих руди відкритим способом [17]

Глибокі родовища ніобію розробляються з використанням підземного способу видобутку. Руду підривають, а потім залізницею, конвеєром або самоскидом транспортують на збагачувальну фабрику.

Незалежно від використовуваного методу видобутку первинні ніобієві руди спочатку подрібнюють в дробарках, а потім у стрижневих або кульових млинах, що працюють з вібраційними грохотами та шнековими класифікаторами для

вивільнення частинок ніобію. Суспензію, що містить ніобій і пусту породу, додатково концентрують приблизно до 54% оксиду ніобію.

Власна промислова розробка покладів ніобію в Україні наразі відсутня. Водночас промислові концентрації цього стратегічного металу зафіксовані у складі комплексних родовищ та рудопроявів, що просторово приурочені до центральної, південно-східної та північно-східної частин Українського кристалічного щита. Окремим перспективним об'єктом є Мазурівське родовище рідкісних металів, розташоване в Донецькій області. Попри відсутність внутрішнього видобутку, щорічний обсяг споживання ніобієвих концентратів вітчизняним промисловим сектором оцінюється в межах 1000–1200 тонн.

3.3.8. Скандій

Видобуток і збагачення скандію належать до найскладніших напрямків у кольоровій металургії. Скандій є класичним розсіяним елементом, а його кількість у земній корі порівняно велика. Іншою складністю є те, що він майже не утворює власних концентрованих покладів і розосереджений у кристалічних гратках інших мінералів. Через це понад 99% усього скандію у світі видобувають як супутній продукт під час переробки титанових (ільменітових), алюмінієвих (бокситів) та уранових руд. Процес його промислового одержання майже позбавлений стадії механічного збагачення і повністю спирається на складні хімічні та гідрометалургійні технології.

Оскільки скандій вилучається паралельно з іншими металами, спосіб його видобутку залежить від базової руди. У випадку титан-магнієвих та ільменітових руд, скандій концентрується в піроксеневих мінералах, а його видобуток ведеться відкритим (рис. 3.17) або підземним способом.

При отриманні скандію з бокситів процедура має наступну послідовність. Після вилучення оксиду алюмінію скандій накопичується в промислових відходах червоному шламі. Також його вилучення можливе з уранових руд. В даному випадку він вилучається супутньо під час підземного або купчастого вилуговування урану. В природі іноді зустрічаються рідкісні власні мінерали

скандію (наприклад, торвейтит $Sc_2Si_2O_7$ або баззит), але їхні скупчення є мінімальними та не мають промислового значення.



Рисунок 3.17– Розробка скандієвміних руд відкритим способом [18]

Державний баланс запасів корисних копалин України містить дані про поклади скандію у чотирьох комплексних родовищах. До них належать Жовторічнянське (представлене уран-ванадій-скандієвими метасоматитами), Стремигородське й Торчинське (багаті на апатит-титаномагнетит-ільменітові руди та кори вивітрювання), а також Злобичське розсипне родовище ільменіту.

3.3.9. Тантал

Отримання танталу це високотехнологічний та капіталомісткий процес, який ускладнюється тим, що тантал у природі завжди знаходиться разом із ніобієм.

Головним промисловим джерелом танталу є мінеральна група колумбіт-танталіту (часто звана в промисловості колтаном), де мінерал з переважанням танталу називається танталітом $(Fe, Mn)Ta_2O_6$.

Через високу питому вагу і специфічні хімічні властивості, переробка танталу складається з класичного механічного збагачення та надскладного гідрометалургійного розділення.

У природі тантал залягає у гранітних пегматитах і лужних гранітах (наприклад, у Канаді, Австралії, Бразилії). Для отримання критичної сировини гірську породу руйнують буропідривним методом, подрібнюють і транспортують на фабрику.

Видобуток танталовмісних руд може здійснюватися відкритим або підземним способом. Більшість танталу видобувається на кар'єрах (рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Розробка танталовмісних руд відкритим способом [19]

При розробці розсипів (вторинні родовища), мінерали танталу стійкі до вивітрювання, тому часто накопичуються в алювіальних розсипах та корах вивітрювання (поширено в країнах Центральної Африки, зокрема ДР Конго). Видобуток ведеться за допомогою екскаваторів, гідромоніторів або вручну (рис. 3.19).

Тантал також можна супутньо вилучати зі шлаків. Одним з найважливіших джерел отримання танталу є переробка олов'яних шлаків, що утворюються під час виплавки олова (каситериту), де тантал накопичується як супутній елемент.

Видобуток танталу з танталіту включає кілька етапів. Спочатку мінерал подрібнюють і концентрують за допомогою гравітаційної сепарації. Зазвичай це робиться поблизу кар'єру. Тантал отримують при обробці та рафінуванні танталіту. Танталіт це загальна назва будь-якої мінеральної руди, що містить тантал.



Рисунок 3.19 – Розробка танталовмісних руд старательським способом [20]

Після видобутку танталовмісних руд розпочинається процес вилучення танталу. Руду концентрують на ділянці кар'єру або поблизу неї, щоб збільшити відсоток (за вагою) оксиду танталу та ніобію. Матеріал концентрується за допомогою методів мокрої гравітації, електростатичних і електромагнітних процесів.

Запаси танталовмісних руд зосереджені в межах Приазов'я, а також Кіровоградського блока Українського кристалічного щита. Загалом поклади та рудопрояви як танталу, так і ніобію мають комплексний характер і виявлені в північно-західній, центральній та південно-східній частинах цього щита.

3.3.10. Титан

Титан видобувають з інтрузивних кристалічних порід, вивітреної породи та неконсолідованого осаду. Половина всього видобутого титану походить із неконсолідованих відкладень, відомих як берегові розсипи. Розсипи – це алювіальні відкладення, які утворюються річками, коли вони досягають моря.

На даний момент в світі розвідано понад 300 балансових родовищ титанової сировини. Доля алювіальних родовищ складає 69 % (230 родовищ в світі); магматичні (пластові породи) – 19,5 % (70 родовищ); латеритові (елювіальні) – 11,5 % (10 родовищ).

Видобуток розсипних родовищ здійснюється або мокрим або сухим способом (рис. 3.20). Висота рівня ґрунтових вод, де знаходиться відкладення, визначає, який метод потрібен. Після видобутку, руди потребують концентрації, гравітаційного збагачення перед пінною флотацією, яка допомагає видалити сульфіди або інші небажані осади.



Рисунок 3.20 – Розробка осадових родовищ титанових руд відкритим способом [21]

Корінні (магматичні) родовища це первинні джерела титану, де рудні мінерали залягають безпосередньо у твердих кристалічних гірських породах у місцях їхнього початкового утворення. На відміну від латеритних кор вивітрювання чи розсипів, які є пухкими, корінні родовища являють собою монолітні скельні масиви, що утворилися мільярди або сотні мільйонів років тому під час застигання магми в земній корі. Приклад розробки титанових руд на корінному родовищі наведено на рис. 3.21.



Рисунок 3.21 – Розробка корінних родовищ титанових руд відкритим способом [22]

Варто підкреслити, що Україна має найбільші в Європі ресурси і запаси титану і входила до 10-ки світових лідерів за його видобутком. На сьогодні Державним балансом запасів корисних копалин України враховується 15 родовищ титану (з 40), які мають високий ступінь розвідки і промислового освоєння.

Підтверджені Державною службою геології та надр України (Держгеонадра) промислові запаси металічного титану оцінюються в 8,4 мільйона тонн. Цього обсягу, за підрахунками експертів, вистачило б для повного забезпечення потреб США та ЄС протягом 25 років.

Ці родовища розташовані в межах Київської, Дніпропетровської, Харківської, Житомирської областей і приурочені до Українського щита та Дніпровсько-Донецької западини. Родовища відносяться до алювіальних, залишкових та корінних і володіють значним потенціалом до освоєння.

3.4. Метали платинової групи

3.4.1. Загальні відомості про метали платинової групи

Метали платинової групи (МПГ) це шість благородних перехідних елементів, які мають схожі фізико-хімічні властивості та часто зустрічаються разом у земній корі (рис. 3.22). До цієї групи належать рутеній, родій, паладій, осмій, іридій та платина. Вони вирізняються надзвичайно високою стійкістю до корозії, зношування та агресивних хімічних речовин.

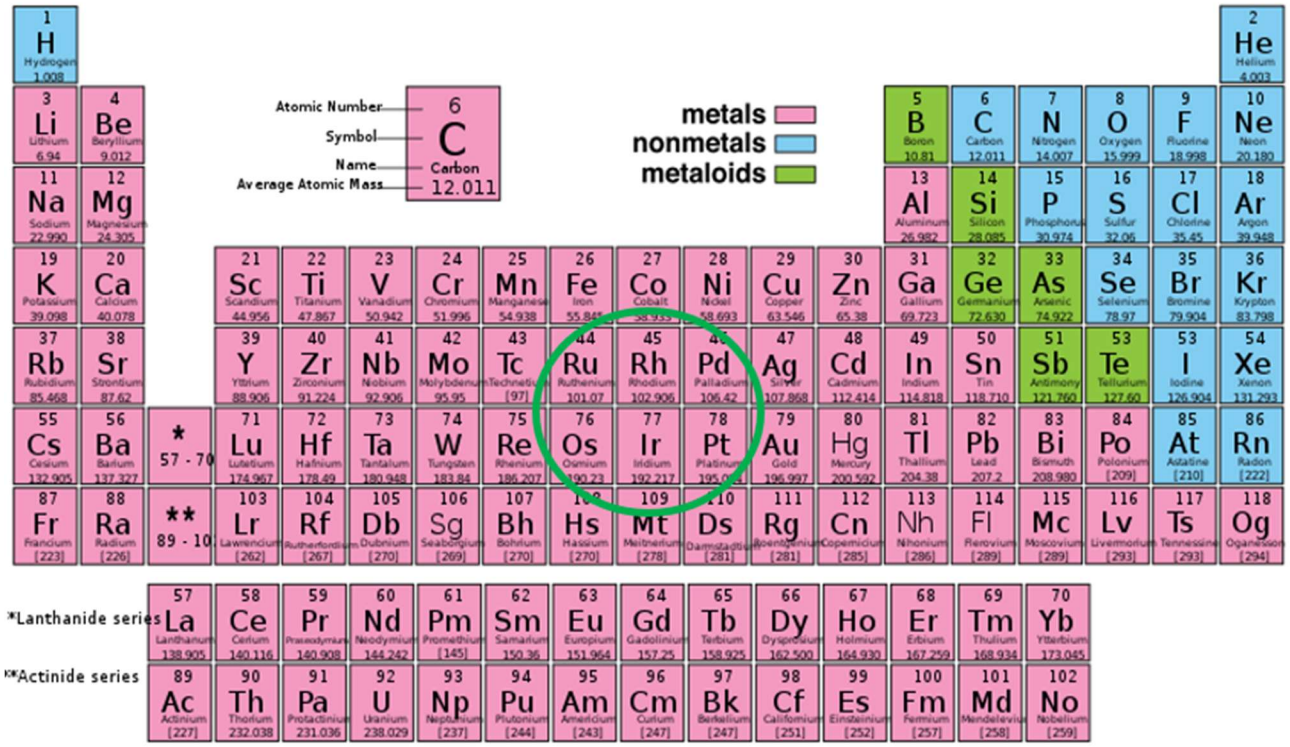


Рисунок 3.22 – Розташування елементів платинової групи у періодичній таблиці [23]

Завдяки високим температурам плавлення та унікальним каталітичним властивостям МПГ є незамінними у промисловості. Їх активно використовують у виробництві автомобільних каталізаторів, ювелірних виробів, електроніки та хімічній індустрії. Через свою рідкісність і складність видобутку ці метали мають дуже високу ринкову вартість.

Однак критичного значення ці метали набувають у контексті забезпечення технологій зеленого переходу, а саме паливних елементів (воднева технологія).

Саме платина та іридій застосовуються при створенні найефективніших каталізаторів в електролізерах для розщеплення води та у паливних елементах для генерації електрики. Саме тому на сьогодні вони є ключовими матеріалами для розвитку водневої енергетики, особливо у виробництві «зеленого» водню. Також варто відзначити паладій, який завдяки своїй унікальній здатності вбирати водень використовується для його надчистої фільтрації, зберігання та транспортування. Висока стабільність МПГ забезпечує довговічність водневого обладнання в екстремальних хімічних умовах.

3.4.2. Іридій

Іридій зустрічається в природі як некомбінований елемент або в природних сплавах, особливо в іридій-осмієвих сплавах під назвою осміридій. Він утворює власні мінерали (IrOS, IrOSRu та ін.), що тісно зростаються з іншими платиновими мінералами. Платиноносні і золотоносні розсипи розробляються відкритим (рис. 3.23) або підземним способами.

Іридій одержують із концентратів металів платинової групи. Ці концентрати виробляють завдяки збагаченню корінних руд та переробці анодних шламів, що залишаються після електролізу міді й нікелю. Іншими джерелами сировини є шліхова платина з розсипних родовищ, а також вторинний брухт дорогоцінних металів.

Найбільші відомі первинні запаси іридію знаходяться в магматичному комплексі Бушвельд у Південній Африці, також ударний кратер в Канаді є значним джерелом іридію.



Рисунок 3.23 – Розробка іридійвмісних руд відкритим способом [24]

Щоб відокремити платинові метали, їх спочатку потрібно перевести в розчин. Два способи перетворення руд, що містять Ir, у розчинні це плавлення твердої речовини з перекисом натрію з подальшою екстракцією отриманого скла в царській горілці та екстракція твердої речовини сумішшю хлору з соляною кислотою. Від розчинних екстрактів іридій відокремлюють осадженням твердого гексахлороіридату амонію або екстракцією $[IrCl_6]^{2-}$ з органічними амінами.

Іридій також комерційно отримують як побічний продукт при видобутку та переробці нікелю та міді. Під час електрорафінування міді та нікелю благородні метали, такі як срібло, золото та метали платинової групи, а також селен і телур осідають на дно комірки як анодний шлам, який є початковою точкою для їх вилучення.

У 2018 році світове виробництво іридію становило близько 7,3 т. Платинові метали зустрічаються разом у вигляді розбавлених руд. Іридій є одним із рідкісних платинових металів: на кожні 190 тонн платини, отриманої з руд, виділяється лише 7,5 тонн іридію.

Незважаючи на те, що Україна є значним споживачем платиноїдів, використовуючи їх у хімічній, електронній, нафтохімічній, ювелірній

промисловості, сировинна база металів платинової групи відсутня за затвердженими балансовими запасами. Потреби країни задовольняються за рахунок імпорту (близько до 900-1000 кг платини).

Результати геологорозвідувальних робіт свідчать, що докембрійські мафіт-ультрамафітові комплекси Волинського, Дністровсько-Бузького, Середньопридніпровського та Приазовського мегаблоків Українського щита мають високий потенціал для виявлення промислових покладів платини і платиноїдів. Перспективними об'єктами також визнано рифейські трапи Волині та протерозойські залізорудні формації.

3.4.3. Паладій

Головними світовими постачальниками паладію є Росія та ПАР – станом на 2018 рік на них припадало 40% та 32% глобального видобутку відповідно. Серед інших помітних виробників цього металу виділяються Канада, США та Зімбабве. Водночас вагому роль у забезпеченні ринку відіграє вторинна переробка паладію.

Найбільше використання паладію сьогодні в каталітичних нейтралізаторах. Він також використовується в ювелірних виробах, стоматології, виготовленні годинників, смужках для тестування рівня цукру в крові, свічках запалювання літаків, хірургічних інструментах та електричних контактах.

Як товар, злитки паладію мають коди валюти ISO XPD і 964. Паладій є одним із чотирьох металів, які мають такі коди, інші – це золото, срібло та платина. Оскільки він адсорбує водень, паладій був ключовим компонентом суперечливих експериментів з холодного синтезу кінця 1980-х років.

Водень легко дифундує через нагрітий паладій, і мембранні реактори з Pd мембранами використовуються для виробництва водню високої чистоти. Паладій використовується в паладієво-водневих електродах в електрохімічних дослідженнях. Хлорид паладію (II) легко каталізує газоподібний оксид вуглецю до вуглекислого газу та є корисним у детекторах оксиду вуглецю.

При видобутку паладію використовуються відкритий (рис. 3.24) і підземний способи видобутку корисних копалин з використанням гірничотранспортних робіт, а скельні породи попередньо готуються до виймання за допомогою буропідривного методу. Після отримання руди з кар'єру вона спрямовується на збагачувальну фабрику.



Рисунок 3.24 – Розробка паладієвих руд відкритим способом [25]

Збагачення паладієвмісних руд здійснюється методом пінної флотації з подальшим плавленням у конвертерах та електропечах, що дозволяє очистити сировину від заліза й сірки. Коли з рудної маси вилучають основні компоненти (мідь та нікель), паладій разом із рештою платиноїдів концентрується у шламах.

Для подальшого виділення чистого металу зі шламів, шліхової платини чи брухту застосовують хімічний афінаж. Процес починається з розчинення матеріалу в «царській горілці» (суміші нітратної та хлоридної кислот) та осадження платини за допомогою хлориду амонію. З розчину, що залишився, при нагріванні аміаком виділяють сіль Вокелена. Її повторно розчиняють в аміаку для отримання тетраамінхлориду паладію. Після додавання хлоридної кислоти утворюється осад паладозаміну $[Pd(NH_3)_2Cl_2]$. Фінальний етап передбачає

прожарювання цієї солі в тиглі та відновлення оксиду паладію воднем, внаслідок чого утворюється губчастий технічний паладій.

3.4.4. Платина

Видобуток платинової руди відкритим способом застосовується тоді, коли платиновмісні породи залягають близько до поверхні землі (рис. 3.25). Процес включає масштабні підривні та розкривні роботи, після чого руду завантажують важкою технікою та транспортують на збагачувальні фабрики. Цей метод є економічно вигіднішим і безпечнішим, ніж підземний спосіб розробки, проте він завдає значного екологічного впливу на навколишнє середовище.



Рисунок 3.25 – Розробка платиновмісних руд відкритим способом [26]

Платину, як і решту металів платинової групи, комерційно отримують як побічний продукт при видобутку та переробці нікелю та міді. Під час електрорафінування міді благородні метали, такі як срібло, золото та метали платинової групи, а також селен і телур осідають на дно комірки у вигляді «анодного шламу» для вилучення металів платинової групи.

Чиста платина може бути знайдена в розсипних родовищах або інших рудах. У цьому випадку її відділяють різними методами віднімання домішок.

Оскільки платина значно щільніша за багато інших домішок, тому вони просто розводяться у рідині.

Платина є парамагнітною, тоді як нікель і залізо є феромагнітними. Таким чином, ці дві домішки видаляються за допомогою електромагніту над сумішшю. Оскільки платина має вищу температуру плавлення, ніж більшість інших речовин, багато домішок можна спалити або розплавити без плавлення платини. Також в збагаченні використовують стійкість платини до соляної та сірчаної кислот, тоді як інші речовини легко піддаються руйнуванню.

Одним із придатних методів очищення сирої платини, яка містить платину, золото та інші метали платинової групи, є обробка її царською горілкою, у якій паладій, золото та платина розчиняються, тоді як осмій, іридій, рутеній та родій залишаються без реакції.

Золото осаджують додаванням хлориду заліза (II), а після відфільтрування золота платину осаджують у вигляді хлорплатината амонію додаванням хлориду амонію. Хлороплатинат амонію можна перетворити на платину шляхом нагрівання. Неосаджений гексахлорплатинат (IV) можна відновити елементарним цинком, і подібний метод підходить для невеликого відновлення платини з лабораторних залишків.

З 218 тонн платини, проданої в 2014 році, 98 тонн було використано для пристроїв контролю викидів транспортних засобів (45%), 74,7 тонн для ювелірних виробів (34%), 20,0 тонн для хімічного виробництва та переробки нафти (9,2%) і 5,85 тонн для електричних застосувань, таких як жорсткі диски (2,7%). Решта 28,9 тонн пішли на інші незначні застосування, такі як медицина та біомедицина, обладнання для виробництва скла, інвестиції, електроди, протипухлинні ліки, датчики кисню, свічки запалювання та турбінні двигуни.

Вона використовується як каталізатор паливних елементів для забезпечення оптимальної швидкості реакцій водню та кисню. Він використовується в технологіях протонообмінної мембрани (PEM) на основі платини, необхідних для виробництва зеленого водню, а також у застосуванні електромобілів на паливних елементах (FCEV).

В Україні поклади магнезіальних руд із платиноїдами зосереджені в Середньому Побужжі. Вони пов'язані з ультрабазитами, які містять 43% оксиду магнію, 0,35% нікелю та 0,4% металів платинової групи. Перспективні ресурси руди в цьому регіоні оцінювалися у 546 млн тонн. Водночас загальні прогнозні ресурси металів платинової групи (МГП) в країні є досить скромними – до 300 тонн, що становить близько 0,6% від світових запасів.

3.4.5. Осмій

Головні запаси осмистого іридію розташовані в Сполучених Штатах Америки (зокрема на Алясці та в Каліфорнії), Колумбії, Канаді, ПАР, на острові Тасманія, а також в Австралії. Казахстан є єдиним експортером чистого осмію. Найбільшими запасами володіють родовища Бушвельдського комплексу у Південно-Африканській республіці.

Видобуток МПГ руд у ПАР здійснюється як правило підземним (рис. 3.26) або відкритим способом. Наступним етапом є подрібнення та сепарація на основі сили тяжіння (або щільного середовища), а потім флотація для отримання МПГ концентрату. Потім концентрат плавлять для отримання Ni-Cu штейну, багатого на МПГ.



Рисунок 3.26 – Розробка осмієвмісних руд підземним способом [27]

Більшість шахт працюють на глибині нижче 500 метрів і до 2 кілометрів. Їхні рудні тіла мають вузьку форму та різну ширину від 0,9 до 2,1 метра, що вимагає трудомістких методів видобутку.

Осмій вилучають з платинових концентратів відгонкою OsO_4, який вловлюють за допомогою лужного розчину для подальшого осадження осмію. Отриманий осад піддають відновленню, внаслідок чого утворюється чистий осмієвий порошок. Його також комерційно отримують як побічний продукт при видобутку та переробці нікелю та міді. Під час електрорафінування міді та нікелю благородні метали, такі як срібло, золото та метали платинової групи, разом із неметалічними елементами, такими як селен і телур, осідають на дно комірки у вигляді анодного шламу, який утворює вихідний матеріал для видобутку.

Розділення металів вимагає, щоб вони спочатку були переведені в розчин. Це можна досягти кількома методами, залежно від процесу розділення та складу суміші. Два репрезентативних методи: злиття з перекисом натрію з наступним розчиненням у царській горілці та розчинення в суміші хлору з соляною кислотою. Осмій можна відокремити від платини, золота та недорогоцінних металів через їх нерозчинність у царській горілці.

Оцінки щорічного світового виробництва осмію становлять від кількох сотень до кількох тисяч кілограмів. Дані про виробництво та споживання осмію невідомі, оскільки попит на метал обмежений і може бути задоволений побічними продуктами інших процесів рафінування. Статистика часто повідомляє про осмій разом з іншими другорядними металами платинової групи, такими як іридій і рутеній. Імпорт осмію в США з 2014 по 2021 рік становив у середньому 155 кг на рік. Осмій використовують як каталізатор для синтезу аміаку, гідратації органічних сполук, як легуючий додаток до надміцних сплавів.

В Україні запаси осмію розвідані в унікальних фенакіт-гентгельвіновими рудах Пержанського родовища берилію, де також знаходяться значні концентрації рідкісних земель, цирконію, ніобію, танталу, олова, ітрію, флюориту, кадмію, індію, срібла, золота.

3.4.6. Родій

Родій переважно отримується як побічний продукт видобутку платини та паладію, оскільки він часто зустрічається разом із цими металами в родовищах металів платинової групи. Процес екстракції складний і вимагає спеціальних методів через високу температуру плавлення родію та його схильність утворювати сполуки, які важко розділити.

Основними виробниками родієвої руди є Південна Африка та Зімбабве, причому Південна Африка є найбільшим джерелом світового постачання родію. Родовища родію зазвичай розташовані в шаруватих магматичних інтрузіях або алювіальних відкладах.

Складність видобутку родію сприяє його високій цінності та рідкості як дорогоцінного металу. Крім того, його виняткові властивості, такі як висока температура плавлення (1964°C) і чудова стійкість до корозії, роблять його особливо складним для переробки, але цінним для видобутку.

Для виявлення життєздатних родієвмісних рудних родовищ виконують геологорозвідку. Ці руди можуть видобуватися з використанням підземного або відкритого способу (рис. 3.27) в залежності від характеристик родовища.



Рисунок 3.27 – Розробка родієвмісних руд відкритим способом [28]

Видобута руда піддається подрібненню та пінній флотації для відділення цінних мінералів від відходів. Ця стадія часто дає концентрат, що містить родій разом із платиною та паладієм. При збагаченні концентрат піддається різним процесам рафінування, таким як плавка та електроліз, для отримання родію високої чистоти. Для видалення домішок зазвичай використовуються такі методи, як екстракція розчинником і осадження.

Освоєння родію має вирішальну роль у глобальному ланцюжку постачання для каталітичних нейтралізаторах автомобілів для зменшення шкідливих викидів. Рідкість і високий попит на родій сприяють його значній ринковій вартості, що робить видобуток життєво важливим як для місцевої економіки, так і для світової автомобільної промисловості.

Південна Африка, на яку припадає близько 80% виробництва родію, бореться з серйозним дефіцитом електроенергії, спричиненим внутрішніми кризами. Через часті перебої в технічному обслуговуванні гірничі підприємства працюють на зниженій потужності, що ще більше обмежує постачання.

Крім того, Зімбабве, ще один відомий виробник, стикається зі своїми проблемами, включаючи політичну нестабільність та інфраструктурні проблеми, які перешкоджають видобутку. Поєднання цих факторів, ймовірно, призведе до підвищення волатильності цін і невизначеності пропозиції на ринку родію, оскільки попит залишається стабільним, особливо з боку автомобільної промисловості на каталітичні нейтралізатори.

Інформація щодо рудопроявів родію в Україні у відкритих джерелах відсутня.

3.4.7. Рутеній

Щороку видобувається приблизно 30 тонн рутенію, а світові запаси оцінюються в 5000 тонн. Склад видобутих сумішей металів платинової групи значно змінюється в залежності від геохімічної формації. Наприклад, МПГ, видобуті в Південній Африці, містять в середньому 11% рутенію, тоді як в інших країнах виробниках цей показник не перевищує 2%.

Рутеній, осмій та іридій вважаються другорядними металами платинової групи. Він (рис. 3.28), як і інші метали платинової групи, також комерційно отримують як побічний продукт переробки нікелевої, мідної та платинової металевої руди.



Рисунок 3.28 – Розробка рутенієвмісних порід [29]

Також рутеній міститься у відпрацьованому ядерному паливі як продукт прямого поділу, так і продукт поглинання нейтронів довгоживучим продуктом поділу 99Tc (Технецій-99). Після того, як нестабільні ізотопи рутенію розпадуться, хімічна екстракція може дати рутеній для використання в усіх сферах його застосування.

Під час електрорафінування міді та нікелю благородні метали, такі як срібло, золото та метали платинової групи, випадають у вигляді анодного шламу, вихідної сировини для екстракції. Метали перетворюються на іонізовані розчинені речовини будь-яким із кількох методів залежно від складу вихідної сировини. Одним із репрезентативних методів є плавлення з перекисом натрію з наступним розчиненням у царській горілці. Оскільки рутеній є нерозчинним в царській горілці та легко випадає в осад, а інші метали залишаються в розчині.

Нерозчинний залишок, що містить Ru, Os та Ir, обробляють оксидом натрію, в якому Ir є нерозчинним, утворюючи розчинені солі Ru та Os. Водень використовується для відновлення хлориду рутенію амонію з утворенням порошку. Продукт відновлюється за допомогою водню, утворюючи метал у вигляді порошку або губки, який можна обробити за допомогою методів порошкової металургії або аргонодугового зварювання.

У 2016 році було спожито приблизно 30,9 тонни рутенію, з них 13,8 тонни в електротехніці, 7,7 тонни в каталізі та 4,6 тонни в електрохімії. Оскільки він зміцнює платинові та паладієві сплави, рутеній використовується в електричних контактах, де для досягнення бажаної довговічності достатньо тонкої плівки. Завдяки подібним властивостям до родію та нижчій вартості, електричні контакти є основним використанням рутенію. Його пластина наноситься на електричний контакт і основний метал електрода шляхом гальванічного покриття або напилення. Діоксид рутенію з рутенатами свинцю та вісмуту використовуються в товстоплівкових резисторах. На ці два електронні засоби припадає 50% споживання рутенію.

Рутеній рідко легують металами поза платиновою групою, де невеликі кількості покращують деякі властивості. Його також використовують як компонент анодів із змішаних оксидів металів, які використовуються для катодного захисту підземних і занурених споруд, а також для електролітичних елементів при генеруванні хлору з солоної води.

3.4. Критичні лужні та лужноземельні метали

3.4.1. Барит

Видобуток бариту може відбуватися відкритим способом за умови, що родовище знаходиться близько до поверхні. Розробка кар’єру відбувається за класичною схемою із використанням розкривних і видобувних робіт. Баритова руда готується до видобутку за допомогою буропідривних робіт, після чого екскаваторами завантажується на конвеєри або самоскиди (рис. 3.29). Руда с

кар’єру спрямовується на переробний завод де починається процес подрібнення, щоб створити задану фракцію для збагачувальної фабрики.



Рисунок 3.29 – Розробка баритових руд на кар’єрі [30]

При підземному видобутку освоюються родовища бариту, що розташовані на значній глибині. Для доступу до родовища створюють під’їзні шахти або тунелі. Методи підземного видобутку можуть включати видобуток у камерах і стовпах або видобуток з лавами, де барит видобувається вибірково, залишаючи стовпи або цілики.

У деяких випадках для видалення домішок і збільшення вмісту бариту можуть бути використані процеси збагачення. Ці процеси можуть включати методи магнітної сепарації, флотації або гравітаційної сепарації. Оброблений барит зазвичай сушать, щоб зменшити вміст вологи, а потім упаковують у мішки або контейнери для насипу для відправлення клієнтам.

На території України цей елемент виявлений у гідротермальних покладах Закарпаття, на Нагольному кряжі та в інших районах Донбасу, а також у Придністров’ї та Прикарпатті. Найбільший практичний інтерес становлять Біляївське родовище (Харківська область) та унікальне для країни Біганьське комплексне алуніт-барит-поліметалічне родовище, розташоване в Берегівському районі на Закарпатті.

Рудна сировина Біганьського родовища відзначається високою збагачуваністю. Завдяки гравітаційному методу можна отримувати високоякісний концентрат із вмістом сульфату барію на рівні 80–92%. Рудні тіла тут представлені жилами із західним падінням під кутом 70–80°. Для родовища характерна чітка вертикальна зональність: верхній горизонт (до 130–200 м) складений баритовими рудами, середній (до 400–500 м) – свинцево-цинковими, а на глибині понад 350–600 м залягають золотоносні руди. Потужність баритових жил коливається від 1 до 23 м (у середньому 6,1 м). При цьому до глибини 40–80 м руда знаходиться вище рівня грунтових вод, тоді як нижчі горизонти є значно обводненими.

Баритові руди розвідані детально: вище рівня підземних вод – штольнями, нижче – свердловинами. Загальні промислові запаси складають 4,2 млн тонн руди, з яких 1,9 млн тонн затверджені Державною Комісією по запасах корисних копалин. Середній вміст $BaSO_4$ в баритових рудах – 40%, в змішаних рудах (барит-поліметалічних) – 13-25%. В даний час родовище не розробляється, так як необхідно оцінити промислову значимість всіх корисних компонентів.

3.4.2. Берилій

Це твердий, дуже легкий, сріблясто-білий метал, який можна видобувати підземним або відкритим способом (рис. 3.30). Він може бути присутнім у вугіллі, нафті, мінеральних породах, вулканічному пилу та ґрунті. Берилій добувають із двох видів мінеральних порід: бетрандриту та берилу.

Ці мінерали в основному містяться в граніті та пегматитах. Інші руди, які можуть містити берилій, включають фенакит і хризоберил. У гірничодобувній промисловості берилій може міститися в рудах, які видобуваються для отримання інших корисних копалин.

У процесі екстракції використовується вилуговування руди в сірчаній кислоті для отримання сульфату, який піддається екстракції розчинником для видалення домішок.



Рисунок 3.30 – Видобуток берилієвих руд відкритим способом [31]

Фракція, що містить значну кількість берилію після екстракції розчинником, реагує з карбонатом амонію з утворенням складного карбонату, який можна розділити на чисту форму гідроксиду берилію, який є основним матеріалом, що використовується для виробництва всіх корисних форм берилію.

Металева форма берилію виробляється з гідроксиду за допомогою процесу відновлення магнію для перетворення фториду берилію на гальку берилію та фторид магнію.

Гальку додатково очищають до >99,5% чистоти шляхом плавлення у вакуумі та подрібнюють для перетворення в корисні форми за допомогою звичайного процесу пресування та консолідації порошкової металургії.

Всього в світі 3 країни, які мають повний цикл виробництва берилію: від руди до металу. Це США, Китай і Казахстан, як спадкоємець технологій Радянського Союзу.

На сьогодні промислове освоєння берилію в Україні перебуває на етапі підготовки. Основні промислові запаси берилієвих руд зосереджені в межах Сущано-Пержанської тектонічної зони Українського щита. Рудні тіла тут

складені метасоматитами польовошпатового, кварц-польовошпатового, а також польовошпат-сидеритового типу.

Берилієва мінералізація у формі хризоберилу зафіксована також у пегматитах Петроострівсько-Полохівського рудного поля. Крім того, перспективні рудопрояви берилію виявлені в Приазов'ї, зокрема на Шевченківському родовищі літієвих пегматитів, родовищі «Балка Крута», Єлисеївському пегматитовому полі та рудопрояві Кам'яні Могили.

3.4.3. Літій

Головними джерелами промислового видобутку літію у світі є рідкіснометалічні гранітні пегматити, які забезпечують до 25% розвіданих запасів і 55% глобального видобутку, а також літійвмісна ропа соляних озер, на яку припадає до 75% запасів і 45% видобутку. До нетрадиційних джерел відносять гекторитові глини та супутні води нафтогазоконденсатних родовищ.

Світовий видобуток літію з корінних (пегматитових) родовищ базується на розробці мінералу сподумену, де лідером є Австралія, яка забезпечує швидке отримання концентрату відкритим способом (рис. 3.31). В Австралії на заводах з переробки літієвої руди використовується флотація, високоінтенсивні методи магнітної сепарації. Обладнання для обробки літієвої руди це дробарка, кульовий млин, класифікатор, джиг, флотаційна машина, магнітний сепаратор тощо.

Методи переробки літієвої руди можуть включати ручний відбір, метод флотації, хімічний або хімічно-флотаційний комбінований метод, метод термічного крекінгу, метод радіоактивного відбору, метод флотації частинок, зазвичай використовуються перші три методи.

Загалом корінні родовища наразі домінують на ринку твердих руд завдяки відпрацьованим технологіям збагачення, тоді як осадові поклади розглядаються як перспективний резерв для масштабного виробництва акумуляторного карбонату літію. На відміну від пегматитів, осадові руди потребують складнішого кислотного або сульфатного вилуговування для переведення літію в розчин.



Рисунок 3.31 – Розробка пегматитових родовищ літію [32]

Чилі є світовим лідером за обсягом запасів літію (близько 33% від глобальних покладів) та посідає друге місце у світі за рівнем його видобутку, проте технологія тут кардинально відрізняється від корінних чи осадових родовищ (рис. 3.32). Країна видобуває метал із підземних гідротермальних розсолів (ропи), зосереджених під високогірними солончаками – так званими саларами. Процес включає викачування, випаровування і хімічне очищення.



Рисунок 3.32 – Осушення літію з підземних гідротермальних розсолів [33]

Більшість родовищ розсолів знаходяться у Чилі, Аргентині та Болівії. Великі літієво-глинисті родовища, що розробляються в кальдері Макдермітт (Невада, США), вимагають концентрованої сірчаної кислоти для вилуговування літію з глиняної руди. Для виробництва літію шляхом видобутку розсолу потрібна значна кількість води. Щоб видобути літій, гірничодобувні компанії повинні бурити на соляних ґрунтах, а потім викачувати насичений мінералами розсіл на поверхню. При випаровуванні руди з басейнів, концентрація підвищується з 1% до 6 %.

Видобуток з осадових родовищ (літійвмісних глин, таких як гекторит) є відносно новим напрямком, що активно розвивається в США (наприклад, родовище Thacker Pass) як альтернатива традиційній сировині.

До початку 2021 року більша частина літію, що видобувається в усьому світі, надходить або зі «сподумену, мінералу, що міститься в твердих породах, знайдених у таких місцях, як Австралія та Північна Кароліна», або з солоного розсолу, який викачується безпосередньо з-під землі у місцях Чилі. Використання електродіалізу та електрохімічної інтеркаляції було запропоновано для вилучення сполук літію з морської води (яка містить літій у кількості 0,2 частини на мільйон).

Ресурсний потенціал літію в Україні є досить значним і пов’язаний із протерозойськими рідкіснометалічними гранітними пегматитами. Основні запаси зосереджені у двох регіонах: Західному Приазов’ї (родовища Шевченківське та Крута Балка) і центральній частині Українського щита, зокрема в Шполяно-Ташлицькому рудному районі (родовища Полохівське, Станкуватське, «Надія» та Липнязький рудопрояв).

Найвищу перспективність має Полохівське родовище петалітових руд, розташоване в Кіровоградській області, для якого вже виконано попередню оцінку та підготовлено ТЕО розробки. Також ще у 1994 році Міністерство промисловості ініціювало підготовку до експлуатації Шевченківського родовища (Донецька/Запорізька область). Запуск цих об’єктів дозволить повністю задовольнити внутрішній попит і відкриє можливості для експорту.

Наразі щорічна потреба України в карбонаті літію оцінюється в 100–200 тонн (у металі), проте очікується стрімке зростання попиту на петалітовий концентрат (на десятки тисяч тонн) для скляної та керамічної галузей.

3.4.4. Магній

Основними джерелами магнієвої сировини виступають доломіти, магнезити та магнезіальні солі. Крім того, цей метал активно видобувають із морської води та ропи соляних озер, які містять значні концентрації хлориду магнію.

Видобуток магнію відкритим способом здійснюється при розробці родовищ магнезиту і доломіту, що є найдешевшим і найпоширенішим методом у світі (рис. 3.33). Підземний спосіб застосовується значно рідше, переважно для розробки глибоких пластів карналіту або високоякісних руд у складних гірничо-геологічних умовах. Калій-магнієві (соляні) поклади відпрацьовуються підземним камерним способом (глибиною до 2 км) із залишенням захисних циліків, що не підлягають відпрацюванню.



Рисунок 3.33 – Розробка магнієвмісних руд відкритим способом [34]

Після видобутку обидва типи сировини проходять стадію випалювання, після чого магній вилучають пірометалургійним (термічним) або гідрометалургійним (електроліз) шляхом. Процес магнезитової флотації включає процес дроблення та подрібнення. При дробленні руда (менше 200 мм) проходить два етапи одного замкнутого процесу, який включає щокову дробарку та вібросито зменшує фракцію до 0-10 мм, після чого вона поступає на флотацію.

На етапі магнезитової флотації основним обладнанням є резервуар для перемішування, згущувач. Наступні два методи є процесами магнезитової флотації. Процес флотації високоякісної магнезитової руди включає направлення дрібної руди у резервуар для перемішування та змішується з флотаційним реагентом. Флотація магнезитової руди з низьким вмістом враховує, що домішки в сирій руді неможливо видалити, якщо застосовувати лише методи процесу зворотної флотації. Тому для низькосортного використовуються процеси зворотної та прямої флотації. При зворотній флотації відокремлюють частину хвостів, при прямій флотації отримують магнезитний концентрат і промпродукт.

Сировинна база магнієвої промисловості України дозволяє повністю забезпечувати внутрішні потреби в металічному магнії. Вона представлена багатими покладами калійно-магнієвих солей, а також розчинами у ропі природних заток і лиманів. Усі запаси цієї сировини зосереджені у межах трьох ключових регіонів: Передкарпатському передовому прогині, Дніпровсько-Донецькій западині й Донбасі, а також у солоних озерах Криму. Загальний обсяг балансових запасів магнієвих солей у країні перевищує 157,3 млн тонн (у перерахунку на [MgO]).

Ключовими потужностями галузі історично є промислові майданчики у Калуші (Калусько-Голинська група родовищ) та Запорізький титано-магнієвий комбінат. На Івано-Франківщині розташована відома ділянка Домбровського кар’єру, де відкритий видобуток солей тривав до 2003 року. На Полтавщині розвідано Затуринське родовище бішофіту площею 200 км², де продуктивний пласт потужністю 14,5–24,0 м залягає на глибині 2,6 км. Основні ж тверді

поклади Передкарпатського басейну приурочені до міоценових осадових відкладів, які тягнуться вздовж північного підніжжя Карпат смугою завдовжки понад 200 км.

3.4.5. Стронцій

Видобуток стронцію базується на розробці двох його головних промислових мінералів целестину (сульфат стронцію) та стронціаніту (карбонат стронцію), причому на целестин припадає понад 90% світового виробництва.

Поклади цих мінералів зазвичай залягають у вигляді пластів і жил серед осадових порід – вапняків, доломітів і глин. Видобуток руди здійснюється переважно відкритим способом у кар'єрах за допомогою традиційних буровибухових робіт, екскаваторів та самоскидів (рис. 3.34). Якщо рудні тіла розташовані на великій глибині, застосовують підземні шахтні системи розробки з горизонтальними виробками.



Рисунок 3.34 – Кар'єр з розробка стронцієвмісних руд в Намібії [35]

Метою збагачення стронцієвих руд є видалення пустої породи (кварцу, кальциту, гіпсу) та отримання високоякісного целестинового концентрату із вмістом цільової речовини понад 85–90%.

На першому етапі сировину піддають дробленню та подрібненню у шарових млинах для механічного розкриття зростків мінералів. Оскільки целестин має високу питому вагу (~3,9 г/см³), основним методом його первинного збагачення є гравітаційна сепарація за допомогою відсаджувальних машин та концентраційних столів.

Для тонкодисперсних руд із дрібним вкрапленням мінералів ефективно застосовують селективну флотацію з використанням жирних кислот як збирачів. Крім того, на фабриках часто впроваджують магнітну сепарацію для очищення концентрату від залізовмісних домішок.

Отриманий концентрат целестину є бідною хімічною сировиною, тому його піддають металургійній переробці для отримання карбонату стронцію ($SrCO_3$) – базової сполуки, з якої згодом виготовляють ферити, спеціальне скло та піротехнічні суміші. Кінцевий чистий металевий стронцій отримують методом алюмотермічного відновлення його оксиду у глибокому вакуумі при температурах понад 1100 °C.

Єдине в Україні родовище стронцію – Новополтавське комплексне апатит-рідкіснометалічне родовище (розташоване в Пологівському та Бердянському районах Запорізької області) є одним із найбільших у Європі об’єктів такого типу. Стронцій тут є супутнім стратегічним елементом у складі комплексних карбонатитових руд. Оксид стронцію (SrO) міститься як у силікатній матриці, так і безпосередньо в мінералах апатиту. Вміст стронцію в апатитовому концентраті Новополтавського родовища в середньому становить близько 1,2 %.

Контрольні запитання

1. За якими ознаками критичну мінеральну сировину поділяють на класи (металоїди, лантаноїди, неметали тощо) та яка група елементів є фундаментальною для світової напівпровідникової індустрії?

2. Які фізико-хімічні властивості гелію роблять цей благородний газ критично важливою сировиною для космічної галузі та високотехнологічної медицини (МРТ)?

3. У яких галузях промисловості є незамінними неметалеві критичні мінерали – флюорит (плавиковий шпат) та барит?

4. Яку роль відіграють гірничі породи (зокрема фосфорити та калійні солі) у забезпеченні глобальної продовольчої безпеки планети?

5. Які промислові технології (наприклад, процеси Байєра та Холла-Еру) забезпечують трансформацію бокситових руд у чистий конструкційний алюміній?

6. Чому понад 90% світового галію вилучають саме як побічний продукт інших виробництв (алюмінієвого, цинкового чи переробки вугілля), а не як самостійну копалину?

7. З якими основними металами найчастіше асоціюється видобуток вісмуту у світі та які унікальні властивості цього металу зумовлюють його застосування в металургії для створення легкоплавких сплавів?

Список рекомендованої літератури до розділу 3.

1. Bel Air Bauxite Mine. Джерело: https://www.mining-technology.com/projects/bel-air-bauxite-mine/

2. Diagnosing Corruption in the Bauxite Sector in Guinea: Three Conditions for a More Transparent Future. Джерело: https://resourcegovernance.org/articles/diagnosing-corruption-bauxite-sector-guinea-three-conditions-more-transparent-future

3. Chalco injects gallium assets into rare earths affiliate. Джерело: https://www.mining.com/web/chalco-injects-gallium-assets-into-rare-earths-affiliate/

4. Gallium Extraction: NeoTerra’s 85% Recovery in Mozambique Джерело: https://furtherafrica.com/2026/08/17/gallium-extraction-neoterras-85-recovery-in-mozambique/

5. Deady, E., Moon, C., Moore, K., Goodenough, K. M., & Shail, R. K. (2022).

Bismuth: Economic geology and value chains. Ore Geology Reviews, 143, 104722. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104722

6. Ikunolite (Ikunolith). Джерело: https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralData?mineral=Ikunolith

7. Maracas Menchen Vanadium Mine Expansion. Largo Inc. Джерело: https://www.nsenergybusiness.com/projects/maracas-menchen-vanadium-mine-expansion/

8. Wolfram Camp mining area tenders open. Джерело: https://industryqld.com.au/wolfram-camp-mining-area-tenders-open/

9. Nataka Mine. Джерело: https://tectgeological.com/project/nataka-mine/

10. BGS COMMODITY REVIEW: Cobalt. Джерело: https://www.researchgate.net/publication/337604314_BGS_COMMODITY_REVIEW_Cobalt

11. The Hidden Cost of Cobalt: Artisanal Mining in the Democratic Republic of Congo (DRC). Джерело: https://www.humanrightsresearch.org/post/the-hidden-cost-of-cobalt-artisanal-mining-in-the-democratic-republic-of-congo-drc

12. Покровський ГЗК. Джерело: https://gmk.center/ua/manufacturer/pokrovskij-gzk/

13. Manganese demand globally is likely to grow exponentially, as it is considered a key input in renewable technologies. Джерело: https://www.miningweekly.com/article/manganese-key-to-implementation-of-energy-transition-2022-09-23

14. Georgian manganese: a vital resource for the regional economy. Джерело: https://www.allmineral.com/en/system-solutions/manganese-ore-processing-in-georgia/

15. Mina de Chuquicamata, Calama, Chile, 2016-02-01. Джерело: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mina_de_Chuquicamata,_Calama,_Chile,_2016-02-01,_DD_110-112_PAN.JPG

16. Rising nickel prices reignite stainless steel cost concerns. Джерело: https://mepsinternational.com/gb/en/news/rising-nickel-prices-reignite-stainless-steel-

cost-concerns

17. Gonçalves, R.J.D.A.F., & Milanez, B. (2020). A territorialização da rede global extrativa do nióbio em Goiás, Brasil. Ateliê Geográfico, 14(2), 142-162. https://doi.org/10.5216/ag.v14i2.62834

18. Sconi Cobalt-Nickel Scandium Project, Australia. Джерело: https://www.mining-technology.com/projects/sconi-cobalt-nickel-scandium-project-australia/

19. Rwanda: Aterian concludes long-term agreement on tin, tantalum, and tungsten. Джерело: https://www.financialafrik.com/en/2026/06/10/rwanda-aterian-concludes-long-term-agreement-on-tin-tantalum-and-tungsten/

20. On the trail of tantalum: tracking a conflict mineral. Джерело: https://www.mining-technology.com/features/featureon-the-trail-of-tantalum-4831288/?cf-view

21. UMCC – Titanium. Джерело: https://www.umcc-titanium.com/en/

22. Titanium Ore Mining Market. Джерело: https://www.openpr.com/news/2566002/titanium-ore-mining-market-thriving-impressive-business-growth

23. Periodic Table Of Elements. Джерело: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Of_Elements.svg

24. Iridium Digs Deep for Mining Industry. Джерело: https://ifp.iridium.com/blog/iridium-digs-deep-for-mining-industry/

25. North American Palladium tables ‘low-cost, low-risk’ expansion plan for LDI. Джерело: https://www.northernminer.com/news/n-a-palladium-tables-low-cost-low-risk-expansion-at-ldi/1003500889/

26. Platinum giant South Africa forced by virus to look into abyss. Джерело: https://www.miningweekly.com/article/platinum-giant-south-africa-forced-by-virus-to-look-into-abyss-2020-08-11

27. Mining boom drives African infrastructure growth. Джерело: https://www.miningweekly.com/article/mining-boom-drives-african-infrastructure-growth-2026-07-10

28. Rhodium on the rise. Джерело: https://www.mining-technology.com/features/rhodium-on-the-rise/

29. Ruthenium and tantalite prices climb on tight supply. Джерело: https://www.zimining.co.zw/sa-drc-critical-metals/

30. From neglect to prosperity. Джерело: https://www.thenews.com.pk/magazine/money-matters/1099873-from-neglect-to-prosperity

31. Beryllium Mining. Джерело: https://www.greatmining.com/beryllium.html

32. Kyrgyzstan explores lithium extraction partnership with Chinese firm. Джерело: https://daryo.uz/en/2024/06/27/kyrgyzstan-explores-lithium-extraction-partnership-with-chinese-firm/

33. Latin America's Energy Transition: Time for a Breakthrough? Джерело: https://www.americasquarterly.org/article/in-person-event-latin-americas-energy-transition-time-for-a-breakthrough/

34. Enormous open-pit magnesium mine in Czech. Джерело: https://www.shutterstock.com/image-photo/enormous-openpit-magnesium-mine-czech-34496770

35. Largest deposit for magnet producing mineral found. Джерело: https://www.namibian.com.na/largest-deposit-for-magnet-producing-mineral-found/

РОЗДІЛ 4. ОСВОЄННЯ ЛЕГКИХ І ВАЖКИХ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ (ЛАНТАНОЇДІВ)

У розділі наведено основні засади освоєння рідкісноземельних елементів у світі та перспективи їх освоєння в Україні. Спираючись на матеріал розділу, студент повинен мати уявлення про: геохімічні особливості та специфіку класифікації рідкісноземельних металів (РЗЕ), чітко розрізняючи легкі та важкі елементи цієї групи; географічну структуру світового виробництва РЗЕ та причини домінування окремих країн на глобальному ринку цієї сировини; гірничо-геологічні умови залягання рідкісноземельних елементів; принципи технологічних схем освоєння РЗЕ, що включають видобуток, збагачення руд, гідрометалургійну переробку та розділення суміші елементів на чисті метали; потенціал надр України щодо виявлення, розвідки та перспективи промислового освоєння власних родовищ легких і важких рідкісноземельних елементів.

4.1. Загальні відомості про рідкісноземельні метали

Розвиток високотехнологічних галузей XXI сторіччя неможливо уявити без використання легких і важких рідкісноземельних металів. Саме тому вони відносяться до категорії критичної мінеральної сировини, що відіграє визначальну роль у забезпеченні світових ланцюгів постачання, а їх дефіцит, навіть на незначний час, може призвести до зупинки цілих галузей економіки [1]. Існуючий досвід виготовлення і забезпечення споживачів цими матеріалами свідчить, що до 2010 року їх виробництво не мало привабливості через низьку рентабельність, а майже усі РЗЕ у світі виготовлялися в Китаї. Значне скорочення пропозиції з боку китайських компаній призвело до десятикратного зростання світових цін на РЗЕ у 2011 р. і викликало зацікавленість інших країн до освоєння нових або законсервованих родовищ корисних копалин.

Результатом пошуку нових родовищ у світі став вихід на ринки у 2018 році виробників REOs з США, Австралії, М’янми, Таїланду, Малайзії та інших країн [2]. Це дозволило частково диверсифікувати ризики забезпечення світових ланцюгів постачання та стабілізувати вартість рідкісноземельних елементів.

Ключовим споживачем РЗЕ є військово-промисловий комплекс (ВПК), де використовуються матеріали з високими міцнісними характеристиками, спеціальне скло, кераміка, а також різноманітні сплави для розвитку авіації. Важливою складовою частиною алюмінієвих сплавів є надлегкий скандій, що використовується в літакобудуванні. Сфера аерокосмосу, сучасні гаджети, атомна енергетика, фото- та комп'ютерна техніка – все це неможливе без застосування РЗЕ [3].

Використання легких РЗЕ, таких як неодим і празеодим є незамінним у технологіях для енергетики та електротехніки. Їх властивості дозволяють створювати потужні постійні магніти, які застосовуються у двигунах електрокарів, портативних електронних пристроях та вітрових турбінах.

У хімічній промисловості у якості каталізатора застосовується лантан і церій, особливо в процесі крекінгу нафти. Системи очищення вихлопних газів автомобілів ефективні завдяки дії каталізаторів до яких входить церій. При виробництві оптичних лінз і дисплеїв церій використовується як полірувальний матеріал [4]. У металургії для покращення механічних властивостей та корозійної стійкості використовують лантан як легувальну сировину чавунів і сталі. Завдяки церію скло набуває різного кольору, що важливо для оптичних фільтрів та лазерних систем.

Використання важких РЗЕ набуло значного поширення у різних галузях промисловості, особливо у високотехнологічних процесах. Так, тербій і диспрозій входять до складу високотемпературних магнітів на основі неодиму [5]. Наявність цих РЗЕ підвищує стабільність магнітів при нагріванні, що надважливо для двигунів авіа- та автомобільної техніки.

З загальної групи важких РЗЕ варто виділити гадоліній, оскільки завдяки властивостям поглинання нейтронів він може використовується як матеріал для керуючих стрижнів ядерних реакторів [6]. Також він застосовується у медицині як складова частина контрастних речовин магнітно-резонансної томографії (МРТ), при виготовленні діагностичного обладнання та медичних лазерів та інше.

У виробництві люмінофорів для світлодіодів і екранів телевізорів використовується європій, у той же час тулій, ербій і гольмій застосовується в лазерних установках і волоконно-оптичних комунікаційних системах [7].

Особливої уваги заслуговує надлегкий скандій, який за класифікацією Європейської Комісії не відноситься до легких або важких РЗЕ. Він широко використовується як легувальний елемент для виготовлення сплавів на основі алюмінію. Завдяки унікальним фізико-хімічним властивостям його додавання у сплави знижує вагу матеріалів підвищуючи їх стійкість до корозії та міцність [8]. Він ідеально підходить для виготовлення сплавів, що використовуються для літаків, космічних апаратів та ракет. Скандій також використовують у високотехнологічних сплавах для 3D-друку (адитивного виробництва). Це дозволяє друкувати надзвичайно міцні та легкі конструкції військового та промислового застосування. Цей РЗЕ має перспективне застосування в акумуляторах нового покоління та паливних елементах, що збільшує їх термін служби та покращує енергоефективність.

Таким чином, можна стверджувати, що розвиток сировинної бази для отримання легких і важких РЗЕ є одним з ключових напрямів забезпечення високотехнологічних галузей промисловості критичними матеріалами [9, 10], а країни з наявними запасами цих корисних копалин перетворюються на важливих гравців на світовому ринку. Участь у диверсифікації ризиків при функціонуванні ланцюгів поставок РЗЕ споживачам із провідних економік світу дозволить Україні отримати додаткові гарантії безпеки і економічні дивіденди. У цьому зв’язку перед країною постає важливе завдання розвідки, оцінки і освоєння родовищ РЗЕ, як критичного ресурсу для функціонування технологічних галузей економіки [11].

У роботі [12] визначено три основні джерела рідкісноземельних елементів в Україні, до яких відносяться первинні апатит-ільменітові родовища та екзогенні родовища, що утворилися в результаті вивітрювання. Також увага приділена складним ільменіт-рутиловим та ільменіт-цирконієвим родовищам, в яких рідкісноземельні елементи зустрічаються як супутня сировина. Визначено,

що вміст цих елементів у титанових рудах може змінюватися залежно від конкретного родовища та геологічних умов, що підкреслює необхідність аналіз кожної обраної ділянки. Варто відзначити, що основні дослідження в роботі сфокусовані на титанвмісних мінералах у межах Українського кристалічного щита, що не дозволяє охопити всю їх географію в межах країни.

В проведених дослідженнях [13], автори пропонують виділити чотири групи критичної сировини, які мають різну ступінь геологічної визначеності, що обумовлює подальший потенціал для комерційного освоєння. Родовища рідкісноземельних елементів та літію об'єднано в одну групу, до якої належать переважно розвідані родовища зі значними запасами. За наведеною інформацією, в даний час ці родовища не експлуатуються, але можуть бути введені в промисловий видобуток після відповідної геолого-економічної оцінки. Таким чином, результати наведених досліджень дозволяють констатувати недостатній рівень визначеності перспектив освоєння родовищ рідкісноземельних матеріалів з урахуванням їх поділу на легкі та важкі елементи.

У дослідженнях [14] наводиться загальний опис родовищ металевих корисних копалин України, з яких виділено найбільший Криворізький залізорудний басейн, що пов'язаний основою Українського кристалічного щита. Також наведено загальну інформацію щодо розташування комплексних корінних родовища ільменіт-апатитових руд та родовищ дорогоцінних та рідкісноземельних металів. Однак в при виконанні досліджень недостатньо уваги приділено перспективним родовищам критичної сировини, до якої відносяться легкі та важкі рідкісноземельні елементи.

В роботі [15] досліджується вплив війни в Україні на світову торгівлю рідкісноземельними елементами (РЗЕ) та пов'язаними з ними критичними металами (Nb, Ta, Sc, Co, Pd), оскільки зазначені події ставлять під ризик виробництва ключових технологій. Порушення світових ланцюгів постачання критичної сировини призвели до активізації Сполученими Штатами та Європейським Союз зусиль щодо диверсифікації своїх джерел постачання та зменшення залежності від Пекіна. Результати роботи підкреслюють важливість

появи нових гравців на світовому ринку рідкісноземельних елементів, тому роль України, як держави з потужними запасами корисних копалин, має бути переоцінена для залучення потенційних інвесторів.

Дослідження, проведені в роботі [16] дозволяють підкреслити ключову роль рідкісноземельних елементів для досягнення Цілей сталого розвитку схвалених Організацією Об'єднаних Націй. Вони є ключовими у реалізації енергетичного переходу при реалізації програм відновлюваних джерел енергії в різних країнах. Встановлено чинники, що призводять до дефіциту рідкісноземельних металів на світовому ринку. Одним з основних викликів для функціонування ланцюгів постачання рідкісноземельних металів від виробників до споживачів є зростання геополітичних ризиків і загострення міжнародної конкуренції. Таким чином, виконаний аналіз робіт за напрямом досліджень дозволяє визначити актуальність залучення в розробку нових родовищ рідкісноземельних елементів України. Це дозволить частково диверсифікувати ризики постачання критичної сировини на світовому ринку, а розподіл цих родовищ на легкі та важкі рідкісноземельні елементи за оцінкою ЄС дозволить уніфікувати наявну сировинну базу у відповідності до європейського законодавства.

4.2. Світове виробництво рідкісноземельних металів

На 2024 р. світові запаси рідкісноземельних елементів оцінюються у 90 млн т [17], при цьому за оцінкою Геологічної служби США (USGS) майже половина оцінених оксидів цих металів припадає на Китай (44 млн т). На другому і третьому місцях розташовані Бразилія та Індія з 21,0 і 6,9 млн т, відповідно. Наявність значних запасів рідкісноземельних руд в Китаї, обумовлює його домінуючу роль у забезпеченні світових ланцюгів постачання критичною сировиною. В (Табл. 4.1) наведено розподіл між провідними світовими виробниками легких і важких рідкісноземельних елементів за класифікацією Європейської комісії 2023 [18].

Аналіз розподілу видобутку РЗЕ за країнами у світі у 2023 р. (табл. 1) підтверджує, що доля Китаю складає 66,7 – 84,4 % в залежності від конкретного критичного елемента. У той же час виробництво REOs (Rare earth oxides) в Австралії та США сягає 19 % для усіх елементів окрім тербію, диспрозію та скандію. Найбільша доля виробництва в Китаї припадає на тербій та диспрозій, що складає 84,4 % від загального об'єму, у той же час доля виробництва оксиду скандію є найменшою серед інших – 66,7%.

Таблиця 4.1. Основні країни-виробники оксидів рідкісноземельних металів на 2023 р., %

REE	Доля виробництва за країнами, %			
	Китай	Австралія	США	М'янма
Легкі РЗЕ:				
- лантан, церій, празеодим, неодим, самарій	68,3	9,9	9,2	-
Важкі РЗЕ:				-
- ітрій, європій, гадоліній, гольмій, ербій, тулій, ітербій, лютецій	68,3	9,9	9,2	-
- тербій, диспрозій	84,4	-	-	9,3
Скандій:	66,7	-	-	-

Згідно з результатами оцінки Геологічної служби США (USGS) світовий видобуток оксидів РЗЕ у 2024 р склав 390 тис. т. [19], без урахування частини переробки скандію. Відносно 2023 р. виробництво REOs зросло на 9 % завдяки залученню на світовий ринок продукції нових заводів у Китаї, Нігерії та Таїланді.

Найбільша складність, яка пов'язана з отриманням РЗЕ полягає у процесі їх вилучення з рудних покладів, оскільки вони, як правило, зустрічаються у розсіяному стані. Не дивлячись на те, що рідкісноземельні метали в середньому у 200 разів є більш поширеними ніж золото, їх концентрації у більшості випадків є економічно недоцільними до видобування за існуючих технологій.

Загальна кількість рідкісноземельних елементів складає 17, однак варто відмітити прометій, який єдиний серед них є радіоактивним і нестабільним

металом з визначеним періодом напіврозпаду. Через це його використання у промисловості є вкрай обмеженим і він не відноситься до критичної сировини згідно з класифікацією Європейської комісії 2023.

Відповідно до результатів досліджень [20] при виробництві оксидів РЗЕ їх співвідношення між собою за спаданням виглядає наступним чином: церій 43,2%; лантан 24,9%; неодим 16,2%; ітрій 4,9%; празеодим 4,6%; самарій 2,2%; гадоліній 1,4%; диспрозій 0,9%; ербій 0,5%; ітербій 0,4%; європій 0,3%; гольмій 0,2%; тербій 0,2%; тулій 0,1%; лютецій 0,1%. Відповідно до джерела [21], річне виробництво оксиду скандію складає приблизно 40 т, або 0,01% від загального виробництва оксидів РЗЕ у світі. Отримані дані дозволяють орієнтовно визначити річні об’єми виробництва оксидів РЗЕ у 2024 р. за кожним елементом, з урахуванням загального об’єму виробництва 390 тис. т (рис. 1).

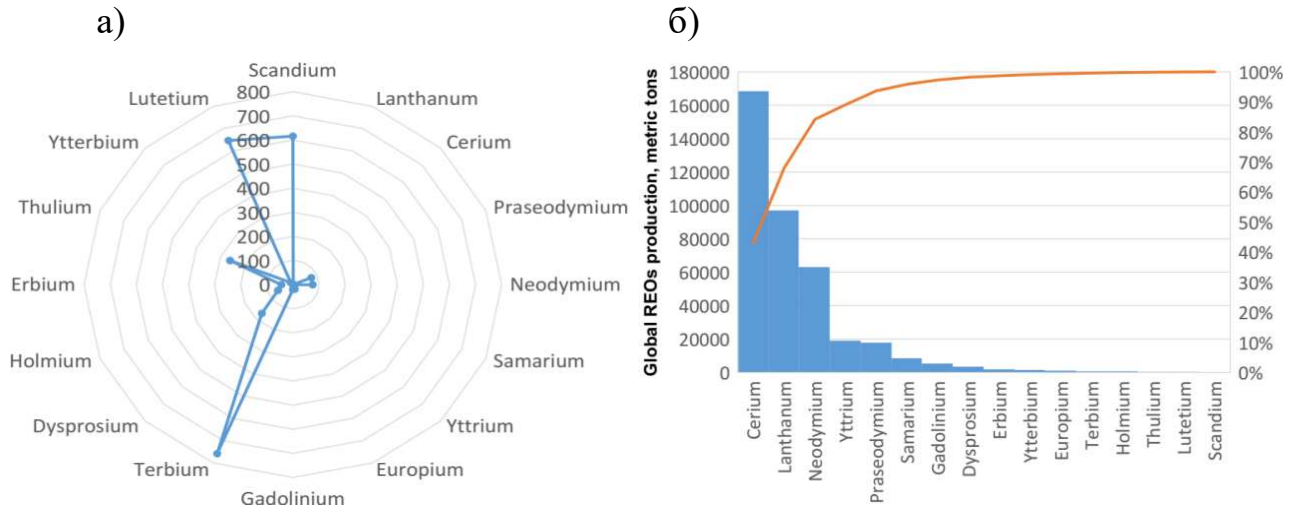


Рисунок 4.1. Річний об’єм виготовлення оксидів рідкісноземельних металів (REOs) у 2024 р.: а – за атомним номером; б – за об’ємами виробництва, тонн

Відповідно до встановлених показників (Рис. 4.1), виготовлення REOs у світі коливається від 40 т скандію до 168 500 т церію. При цьому майже 92% загального об’єму видобутку усіх REOs припадає на оксиди легких LREE. Серед HREE найбільше виготовляється оксидів ітрію, гадолінію, диспрозію та ербію,

європію та ітербію. Виготовлення інших оксидів РЗЕ не перевищує 1000 тонн на рік.

Оскільки виготовлення оксидів РЗЕ є вкрай витратним, а собівартість вилучення збільшується в залежності від складності технологічних процесів і знаходження долі кожного елементу у вихідній сировині їх вартість на світовому ринку буде суттєво різнитися. Для встановлення загальних показників фінансової цінності оксидів кожного РЗЕ, виконано їх ранжування за показником актуальної вартості на світових ринках відповідно до відкритих вихідних даних [22, 23] (рис. 4.2).

а) б)

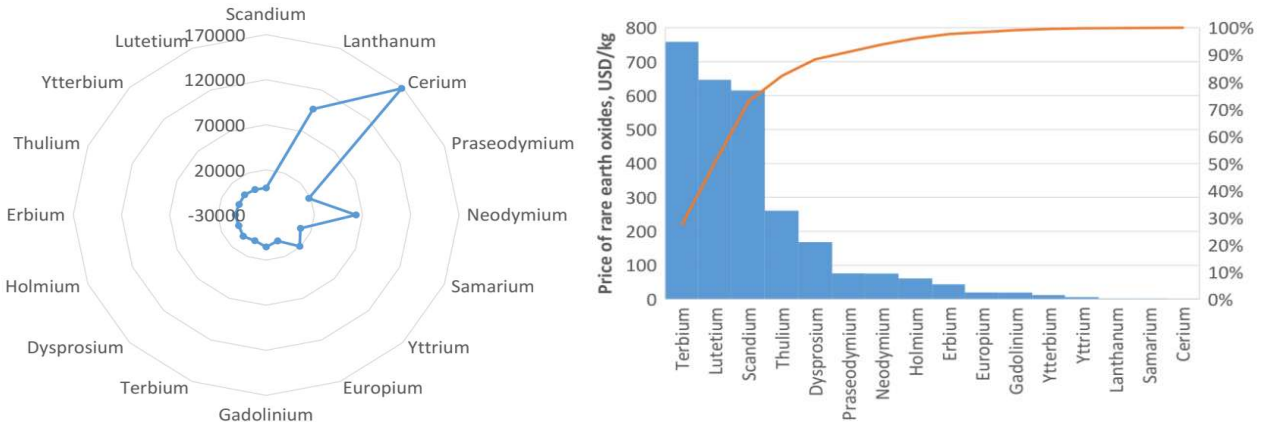


Рисунок 4.2. Вартість оксидів рідкісноземельних металів на світовому ринку у 2025 р.: а – за атомним номером; б – за вартістю продукції, USD/kg

Ранжування оксидів РЗЕ за показником вартості (рис. 4.2) дозволяє стверджувати, що найдорожчім є отримання оксиду тербію, ціна якого в 2025 році складає 758,6 USD/kg [22]. Найменші витрати спостерігаються при виготовлені оксиду церію 1,4 USD/kg. Також визначено, що найбільш вартісними є виготовлення важких REOs: лютецію 646,9 USD/kg, тулію 261 USD/kg [23], диспрозію 168 USD/kg. Вартість решти оксидів РЗЕ не перевищує 80 USD/kg. Дані значення корелюються з об’ємами виготовлення оксидів REOs (рис. 1), оскільки метали які виготовляються в мінімальних об’ємах мають

найбільшу вартість. Аналогічна залежність спостерігається у рідкісноземельного елементу скандію, який за класифікацією ЄС не відноситься до легких або важких REE. Виготовлення його оксиду складає лише 40 т на рік, при цьому вартість сягає 615,4 USD/kg [22].

Аналіз встановлених об'ємів виробництва оксидів легких та важких РЗЕ і скандію, та їх ринкової вартості у 2025 р. дозволяє визначити загальну вартість виготовленої сировини в світі, а також виконати ранжування за вартістю виготовлення окремих рідкісноземельних металів за атомним номером хімічних елементів та ринковою вартістю сировини (рис. 4.3).

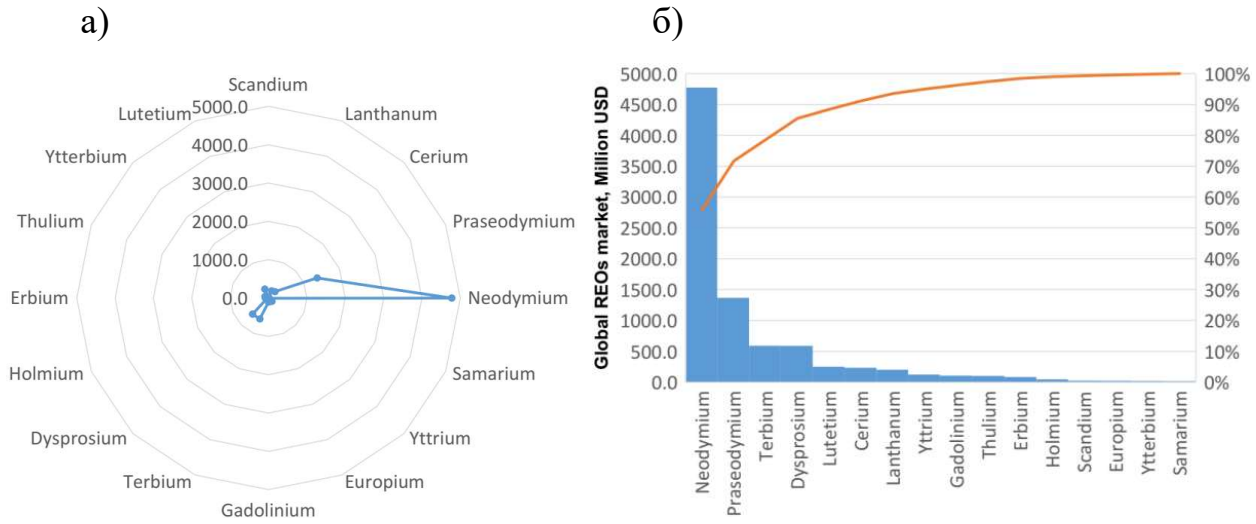


Рисунок 4.3. Загальна вартість сировини з рідкісноземельних металів у 2025 р.: а – за атомним номером; б – за загальною ринковою вартістю сировини, Million USD.

Отримані результати ранжування оксидів РЗЕ за загальною вартістю виготовленої сировини (рис. 4.3 б) дозволяють встановити, що найбільшу вартість сировинного ринку 4,78 млрд USD має оксид неодиму. Це пов'язано з його широким застосуванням в електромобілях, турбінах, лазерному склі та електроніці, і його меншу вартість 75,6 USD/kg у порівнянні з тербієм 758,6 USD/kg чи диспрозієм 168,3 USD/kg. Наступні 3 позиції займають празеодим 1,37 млрд USD, тербій 591,7 млн USD і диспрозій 590,1 млн USD. Найменша

вартість сировинного ринку зафіксована для самарію та складає 18 млн USD. Ринок оксидів скандію складає 24,6 млн USD, при найменшому річному об'ємі виробництва (40 т) у порівнянні з іншими оксидами РЗЕ. Розрахунковий загальний світовий об'єм ринку оксидів РЗЕ у 2025 році складає 8 573,2 млн USD, що корелює із даними 2024 р., за якими оцінка склала 8.7 млрд USD [24].

Для порівняння техніко-економічних показників видобутку і вилучення рідкісноземельних елементів виконано співставлення вартості та об'ємів їх виробництва у відносних величинах (рис. 4.4).

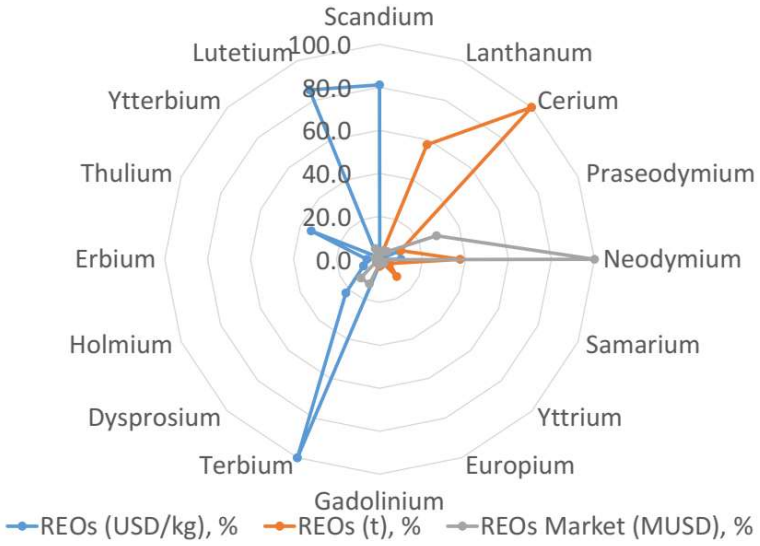


Рисунок 4.4. Порівняння вартості та об'ємів виробництва рідкісноземельних матеріалів у відносних величинах: REOs (USD/kg) – ринкова вартість оксидів рідкісноземельних металів, за 100 % відсотків приймається тербій (758,6 USD/kg); REOs (t) – загальний об'єм виготовлення оксидів рідкісноземельних металів, за 100 % відсотків приймається церій (168 000 t); REOs Market (MUSD) – загальна вартість виготовленої критичної мінеральної у 2025 р., за 100 % відсотків приймається оксид неодиму (USD $4 776M).

Отримані узагальнені результати досліджень (рис. 4.4) дозволяють визначити, що найдорожчими оксидами є важкі REOs – тербій та лютецій, а також скандій; найбільший ринок продажів мають – оксиди неодиму і

празеодиму; найбільший об'єм виробництва мають легкі REOs – церій, лантан і неодим.

Встановлені показники дозволяють в подальшому оцінювати привабливість нових родовищ рідкісноземельних металів шляхом техніко-економічної оцінки. Отримані вартісні показники і об'єми світового виробництва кожного окремого рідкісноземельного металу необхідні для визначення доцільності організації видобувних і збагачувальних робіт на нових родовищах корисних копалин, що потенційно можуть бути залучені в розробку в Україні.

4.3. Гірничо-геологічні умови залягання рідкісноземельних елементів

Для встановлення ефективних шляхів освоєння родовищ легких і важких рідкісноземельних елементів України виконано аналіз гірничо-геологічних умов залягання цих покладів у світі.

На сьогодні у світі визначено понад 70 власних рідкісноземельних мінералів, що відносяться до класів фосфатів, карбонатів, оксидів, фторидів, силікатів, сульфідів та боратів. Особливу групу складають вольфрамати рідкісних земель – ітротунгсит та арсенати – ретціан, які зустрічаються дуже рідко та практично не вивчені. Більшість власних мінералів РЗЕ відносяться до пегматитів, гідротермалитів, та кор вивітрювання. Окрім цього, рідкісноземельні елементи входять як домішки до складу понад 280 мінералів. За складом мінерали РЗЕ поділяють на групи (основні мінерали наведено в дужках): церієві (бастнезит, кноптит, лопарит, монацит, паризит); гадолінієві (самарскіт); ітрієві (евксеніт, ксенотим, ітріаліт); ітрій-ітербієві (фергусоніт). Також встановлена група комплексних мінералів (апатит, ортит, гадолініт, пірохлор, сфен). Накопичення легких лантаноїдів часто відбувається в польових шпатах, а важких – в темнозабарвлених мінералах.

До власних мінералів РЗЕ відносяться (у дужках позначено приклади найважливіших мінералів для промисловості з максимально можливим їх вмістом): фосфати (монацит, рабдофаніт, ксенотім), карбонати (бастнезіт,

паризит), оксиди (фергюсоніт, лопарит, евксеніт), фториди (іттрофлюоріт, іттросінхізіт), силікати (гадолініт, іттріаліт), сульфати, борати та вольфрамати. Також РЗЕ можуть як ізоморфні домішки входити в інші породоутворюючі та акцесорні мінерали [25, 26].

Геохімічна поведінка рідкісноземельних елементів сформована за рахунок їх особливостей, а саме – кристалохімічних зв'язків, іонних радіусів, змін валентності, схильності до комплексоутворення, сорбційних властивостей, термодинамічних умов мінералоутворення тощо [27, 28]. У процесі твердіння магматичного розплаву відбувається розсіяне накопичення РЗЕ, що пов'язано з їх високою розчинністю у фторидних системах. При цьому на постмагматичній стадії, у пегматитах, карбонатитах, їх концентрація зростає внаслідок формування власних мінералів або ізоморфного включення в інші мінеральні фази. Також доведена ймовірність утворення гідротермальних родовищ РЗЕ, наприклад Баян-Обо (Китай), Вуке-Хілл (Танзанія). Аналогічні родовища також зустрічаються і в Україні. Це можна пояснити механізмами відділення сольових розплавів на завершальних етапах еволюції магматичних систем. Згідно з експериментальними даними, РЗЕ в умовах рівноважного розплаву з флюїдом здатні розсіюватись у вигляді складних фторидних, фосфатних, галоїдних форм, іноді навіть за умов атмосферного тиску [25, 27]. У той же час подібні комплекси не виявляються з хлором, проте в умовах хлоридно-сульфідного розділення, елементи можуть концентруватися в силікатних розплавах зі значними коефіцієнтами розподілу. За таких умов можуть утворюватися високотемпературні сольові розчини з високими концентраціями рідкісноземельних елементів, що забезпечує формування їх промислових скупчень.

У процесах гіпергенезу характер розподілу рідкісноземельних елементів (РЗЕ) значною мірою визначається їхньою початковою мінеральною формою, схильністю до гідролізу, здатністю до комплексоутворення, а також можливістю зміни валентного стану [25]. У стійких до вивітрювання мінеральних асоціаціях РЗЕ здатні утворювати елювіальні розсипи, тоді як у поєднанні з нестійкими

компонентами вони можуть бути винесені, або, навпаки, накопичуватись у зоні вивітрювання у каолінітах, гідроксидах заліза чи власних новоутворених мінефазах у вигляді домішок.

За таких умов можливе виявлення промислово значущих концентрацій РЗЕ навіть за низького вмісту елементів у корінних породах, що обумовлює практичну доцільність їх освоєння. Пошук та дослідження подібних об'єктів в Україні набули особливої важливості в умовах зростаючого світового попиту на рідкісноземельну сировину.

За наявними даними [27, 28], процес накопичення елементів у корах вивітрювання відбувається на ранній лужній фазі за рахунок легких лантаноїдів, а важкі елементи та ітрій частково виносяться. На пізній кислотній стадії, навпаки, легкі лантаноїди, зокрема лантан, частково виносяться з гірських порід, тоді як середні та важкі лантаноїди, ітрій, зберігаються у вигляді осадів. Саме це пояснює більш широке поширення легких лантаноїдів у верхній частині кори вивітрювання.

Лантаноїди мають важливе геохімічне значення завдяки здатності до ізоморфного заміщення як між собою, так і з іншими елементами з близькими іонними радіусами. У процесі магматичного диференціювання їх концентрація зростає від мінімальної в ультраосновних і основних породах до формування власних мінералів, таких як ортит, монацит та кайнозит у гранітах, сієнітах та нефелінових сієнітах.

Лужні граніти характеризуються підвищеним вмістом рідкісноземельних елементів і пов'язані з утворенням родовищ бастнезіту, монациту та сфену. З арфедсонітовими лужними гранітами асоціюються пегматити, збагачені гадолінітом, кейльгаутитом, таленітом, бритолітом, а у пірохлор- і колумбітоносних гранітах у вигляді акцесорних компонентів присутні фергюсоніт, ксенотим, гагарініт, монацит [27, 29]. Максимальні концентрації лантаноїдів спостерігаються в нефелінових та лужних сієнітах, що зумовлено наявністю значної кількості власних мінералів, переважно церієвої підгрупи.

Пегматити вирізняються найбільшим різноманіттям і насиченістю рідкісноземельної мінералізації серед магматичних утворень, включаючи як власні мінерали РЗЕ, так і збагачені ними апатит, сфен, гранат та ін.

У процесі екзогенного руйнування корінних порід частина мінералів рідкісних земель, головним чином оксиди та безводні фосфати (монацит, ксенотим, лопарит, евксеніт, самарскіт, ортит тощо), зберігаються і здатні накопичуватись у розсипах. Водночас, переважна більшість РЗЕ-вмісних мінералів, зокрема силікати, безводні карбонати та фториди, є хімічно нестійкими в умовах вивітрювання і переходять у водні карбонати та фосфати, рідкісноземельні колоїдні форми (вуд'яврит) або гідратовані сполуки. У корах вивітрювання РЗЕ часто концентруються як у вигляді власних мінералів (рабдофаніт, бастнезит тощо), так і в складі інших гіпергенних утворень.

На відміну від лантаноїдів, ітрій концентрується лише в гранітоїдах та пов'язаних з ними родовищах, зростаючи у концентраціях від ультраосновних та основних порід до кислих. У гранітоїдах ітрій зазвичай зосереджений в апатиті, сфені, цирконі, епідоті, а також утворює власні мінерали (фергюсоніт, ксенотим, гадолініт, кайнозит). Зазвичай ітрієва мінералізація супроводжує заключні фази становлення інтрузивних масивів та дайок аплітів. При вивітрюванні більшість ітрієвих мінералів стійкі до руйнування і формують розсипи, однак ті ж фториди і силікати ітрію, в результаті хімічного вивітрювання переходять у форму нестійких водних карбонатів і фосфатів [29].

Відповідно генезису РЗЕ виділяють три типи родовищ: ендогенні, екзогенні та матаморфогенні [25], також виділяються за географічними ознаками, за зв'язком із відповідними групами порід тощо. В Україні є так звані традиційні родовища РЗЕ, пов'язані з карбонатитами (Новополтавське) та маріуполітами (Мазурівське), та нетрадиційні, збагачені цирконієві та рідкісноземельно-цирконієві руди, що формуються у безнефелінових сієнітах (Азовське і Ястребецьке родовища). Крім того, в межах Приазов'я виявлено Петрово-Гнутівський прояв руд церієвої групи, представлених переважно паризитом, кальцитом і флюоритом, що робить його близьким до Маунтін-Пасс

(США) і Баян-Обо (Китай). Далі у статті зосереджено увагу на характеристиці перспективніших родовищ РЗЕ в межах України.

4.4. Технології освоєння рідкісноземельних елементів

Рідкісноземельні елементи містять ряд лантаноїдів, а також ітрій і зустрічаються в більш ніж 250 різних мінералах. Незважаючи на те, що іонно-адсорбційні глинисті родовища є значно нижчими, ніж інші види ресурсів лантаноїдів, нижчий рівень значною мірою компенсується меншими витратами на видобуток і переробку та дуже низьким вмістом радіоактивних елементів (як правило, пов'язаних з ітрієм). Просте вилуговування розчинами одновалентних сульфатів або хлоридів при температурі навколишнього середовища може призвести до високоякісного REO продукту. Через велику кількість поверхневих шарів і простий видобуток і обробку ці глини потребують детального вивчення як важливих джерел рідкісноземельних елементів (Chi and Tian 2008).

Видобуток рідкісноземельних елементів здійснюється переважно відкритим способом, після чого руду подрібнюють до стану дрібного порошку. Через низьку концентрацію корисних компонентів у земній корі, подрібнену породу направляють на первинне збагачення методами магнітної сепарації, гравітації або флотації.

Отриманий концентрат піддають складній хімічній переробці, вилуговуючи його кислотами або лугами для переведення металів у розчин. На етапі розділення використовують багаторазову рідинну екстракцію або іонообмінну хроматографію, оскільки хімічні властивості різних РЗЕ надзвичайно схожі. Фінальна стадія очищення дозволяє отримати окремі індивідуальні оксиди та метали високої чистоти, які є критично важливими для сучасної електроніки, зеленої енергетики, оборонної промисловості та інших.

Після дещо складного процесу відділення від попутних елементів за допомогою іонного обміну переводять з суміші у оксид ітрію, потім за допомогою фтороводню у фторид, після чого відновлюють кальцієм. Решту кальцію із сплаву відганяють плавкою у вакуумі. Іттрій зазвичай отримують при

переробці церієвих, уранових і торієвих руд шляхом їх обробки сірчаною кислотою за високої температури. Отриманий розчин пропускають через іонообмінну колону, заповнену катіонообмінною смолою, через яку проходить елюенти - розчин етилендіамінтетраоцтової кислоти. В результаті утворюються комплексні з'єднання ітрію та інших РЗЕ, від яких відновленням відокремлюють ітрій. Європій не зустрічається в природі як вільний елемент і лише 0,2% вмісту рідкісноземельних елементів припадає на нього. Багато мінералів містять європій, найважливішими джерелами якого є бастнезіт, монацит, ксенотім і лопарит-(Ce).

Родовище залізної руди Баян-Обо (рис. 4.5) у Китаї містить значну кількість бастнезиту та монациту та є найбільшим відомим родовищем із приблизно 36 мільйонами тонн оксидів рідкісноземельних елементів.



Рисунок 4.5. – Кар'єр Баян Обо з видобутку рідкісноземельних елементів в Китаї [30].

Гірничі роботи на цьому родовищі зробили Китай найбільшим постачальником рідкісноземельних елементів в світі. Другим великим джерелом рідкісноземельних елементів до 1990-х років був рідкісноземельний рудник Mountain Pass у Каліфорнії. Видобутий там бастнезит особливо багатий легкими рідкісноземельними елементами (La-Gd, Sc і Y) і містить лише 0,1% європію.

Металевий європій отримують відновленням Eu_2O_3 у вакуумі лантаном або вуглецем, а також електролізом розплаву $EuCl_3$. Для вилучення з руди і виділення окремих лантаноїдів розроблено декілька методів. Випал руди з подальшим кислотним і основним вилуговуванням використовується в основному для отримання концентрату лантаноїдів. Також його можна отримувати шляхом електролізу суміші розплавленого $EuCl_3$ і NaCl (або $CaCl_2$) у графітовому елементі, який служить катодом, з використанням графіту як анода. Кілька великих родовищ виробляють чи виробляють значну кількість світового видобутку.

4.5. Потенціал освоєння легких і важких рідкісноземельних елементів в Україні

Аналіз відкритих джерел дозволяє встановити розподіл РЗЕ у породах Українського щита (тут і далі – УЩ). Накопичення легких лантаноїдів тут пов’язане насамперед із карбонатним метасоматозом [29]. Натомість ітрій і важкі лантаноїди концентруються внаслідок калієвого метасоматозу та процесів грейзенізації. Значний інтерес представляють карбонатитні комплекси Новополтавського, Малотерсянського та Мазурівського масивів, а також лужні метасоматити Сущано-Пержанської зони, де зафіксовано інтенсивні постмагматичні процеси, що сприяли формуванню вторинних мінералів - носіїв рідкісноземельних елементів (Рис. 4.6).

Залежно від типу вміщуючих порід, виділяють декілька основних генетичних типів ендогенної мінералізації: цирконієво-торієво-редкісноземельний тип (у гранітах, сієнітах і пегматитах), представлений

родовищами Миколаївське й Сабарівське (Придніпров'я), Ястребецьке (Полісся) та Успенським проявом у Приазов'ї; ітрієво-рідкісноземельно-цирконієвий та церій-лантановий тип (у лужних сієнітах), до якого належать Азовське, Анадольське та Петрово-Гнутівське родовища Приазов'я; урано-торієво-ітрієво-редкісноземельний тип (у калієвих і натрієвих метасоматитах), характерний для Лозуватського, Калинівського та Південного родовищ Кіровоградського уранорудного району, а також для прояву Балка Корабельна [31].



Рисунок 4.6. Родовища корисних копалин України, що містять рідкісноземельні елементи: 1. Іршанське; 2. Малишевське; 3. Федорівське; 4. Стремигородське; 5. Азовське; 6. Анадольське; 7. Петрово-Гнутівський прояв; 8. Ястребецьке; 9. Жовторіченське; 10. Новополтавське (ділянка Музиківська); 11. Мазурівське; 12. Пержанське; 13. Сущанське; 14. Полохівське; 15. Лозуватське; 16. Смілянське; 17. Мотронівське.

Руди більшості перерахованих родовищ відносяться до категорії малозбагачених, що ускладнює їх промислове освоєння та потребує удосконалення методів збагачення.

На основі цього виділено чотири основні райони розвитку ендогенної рідкісноземельної мінералізації – Подільський (Бердичівський, Житомирський та Звенигородський комплекси), Пержанський рудний вузол (Ястребецьке родовище), Криворізький урано-рудний район (Корсунь-Новомиргородський комплекс) та Приазовський район (Новополтавське, Азовське та ін.). Виділяються також прояви рідкісноземельної мінералізації, що пов'язана з корами вивітрювання, та розсипи, що містять монацит (Волино-Подільський та Приазовський райони).

Приазовський регіон охоплює граніти й пегматити Салтичанського, Анадольського та Каменномогильського комплексів, карбонатити Чернігівського та сієніти Південно-Кальчицького комплексу. Рідкіснометально-апатитове Новополтавське родовище відноситься до карбонатитів чернігівського комплексу Оріхово-Павлоградського глибинного розлому. Породи родовища представлені кальцитовими та кальцит-доломітовими карбонатитовими рудами, що формують дайкоподібні та штокові тіла з різко окресленими границями з вміщуючими фенітами, нефеліновими сиенітами і ійоліт-мельтейгитами. Основним рудним компонентом є апатит, супутні мінерали включають монацит, пірохлор, церієвий фергюсоксоніт, колумбіт, циркон, ортит тощо. Головним рідкісноземельним мінералом є монацит, у якому вміст РЗЕ досягає 65%. Він характеризується низьким вмістом торію (0,1–0,3 %), що підвищує технологічну цінність його концентрату. Апатити цього родовища містять значну кількість РЗЕ, вміст яких сягає 11%. Вони представлені церієм і лантаном, також присутні ітрій, самарій, європій, тербій, ітербій та лютецій [27].

В межах родовища розвинена лінійна кора вивітрювання, потужність якої у центральній частині розломної зони досягає 370 м. Є залежність зростання концентрацій компонентів у зоні вивітрювання у декілька разів. Середній вміст апатиту у карбонатитах становить 10%, у невеликих фосфатних тілах досягаючи 50%, і за прогнозними оцінками лише вилучення РЗЕ з апатиту може бути перспективним для освоєння. Ресурси родовища оцінюються у межах 1 млн т монациту та 200 млн т апатиту на глибину до 500 м [32].

Мазурівське родовище є типовим прикладом цирконій-редкісноземельно-ніобієвого комплексу, у масиві нефелінових сієнітів в пірохлор-цирконієвих рудах в альбітитах та маріуполітах. Рудні мінерали в даному масиві представлені пірохлором, цирконом, ферріоксонітом, монацитом, бритолітом тощо. Вміст РЗЕ у рудах змінюється від 0,2% до 65%. Перспективним є комплексне освоєння родовища як джерела глиноземної сировини з паралельним вилученням РЗЕ.

Таким чином, Новополтавське й Мазурівське родовища становлять значний інтерес як джерела легких і важких РЗЕ у межах ендогенної мінералізації, з перспективами комплексного освоєння у стратегічному ресурсному балансі України. Треба відзначити, що промислова концентрація скандію виявлена у межах ряду лужних і ультраосновних комплексів УЩ. Найвищі показники (до 91 г/т) виявлені в перидотитах, піроксенітах та габбро Октябрьського масиву, габбро-норитах Девладівської зони (до 56 г/т), окремих гранітах і їх мінералах. Виняткову увагу слід приділяти пегматитам УЩ, особливо сальтичанським гранітам, де вміст скандію у біотитах сягає 90-120 г/т, гранатах – до 300 г/т, а цирконах до 200 г/т (є дані про 1000 г/т у бердичівських гранітах) [33].

Потенційне джерело сировини становлять також боксити з родовищ Дніпропетровської та Миколаївської областей (Високопільське, Південнонікопольське, Смілянське), де виявлені концентрації скандію в середньому 44,6 г/т у сировині та до 100 г/т у відходах алюмінієвого виробництва.

Серед перспективних об’єктів також важливе значення відіграють родовища, пов’язані з лужними та метасоматичними формаціями. Зокрема, Азовське родовище (див. рис. 5) представляє собою новий промислово-генетичний тип, якому наразі не існує аналогів у світовій практиці. Воно знаходиться у північно-східній частині Приазовського блоку, складеного інтрузивними породами палеопротерозойського південно-кальчицького комплексу. Рудні тіла асоційовані з серією сієнітових штоків. У межах Азовського блоку виявлено дев’ять рудних тіл різної потужності із вмістом

рідкісноземельних елементів до 30%. Руди вкраплені, склад полімінеральний, преставлені бритолітом, бастнезитом, ортитом, цирконом, монацитом, човкінітом, ітріалітом, магнетитом, флюоритом [33].

Основним рідкісноземельним мінералом є бритоліт, представлений вкрапленостями, зростками та агрегатами призматичних кристалів у межах пегматоїдних ділянок та знаходиться в парагенезисі з цирконом, ортитом та рідкісним чевкітом. Бритоліт має комплексний склад, із переважанням церієвих різновидів, хоча присутні й іттрієві форми. Значна частка іттрію (до 6–10% від загальної кількості РЗЕ) підвищує промислову цінність сировини. Треба зазначити, що бритоліт за своїми властивостям та вмістом РЗЕ поступається монациту, що обумовлює його низькі показники при вилученні. За попередніми оцінками, ресурси Азовського родовища (на глибину до 300 м) становлять близько 56 млн т руди із середнім вмістом оксидів рідкісноземельних елементів від 0,4 до 1,27%, а також оксидів цирконію 1,5%. Загальні прогнозні запаси оцінюються на рівні 710 тис. т TR_2O_3, з яких приблизно 20% припадає на ітрієво-лантаноїдну групу, та 840 тис. т Zr_2O_3 [25, 33]. Фактично у межах цього родовища розвинуті кори вивітрювання, що формуються у дезінтеграційній та каолініт-гідрослюдистій зонах, де локалізуються рудні тіла залишкового генезису, збагачені РЗЕ.

Геологічним аналогом Азовського є Ястребецьке родовище цирконієвих руд (розташоване у південно-західній частині Пержанського рудного вузла), проте на даний момент тут не виявлено промислових запасів рідкісноземельних елементів, хоча у лужних сієнітах простежується аналогічний мінеральний склад, зокрема наявні бритоліт, ортит та бастнезит. В межах родовища присутні кілька серпоподібних рудоносних зон збагачених цирконом. Їх потужність складає від 5 до 120 м при максимальній довжині до 2 км. У складі руд також присутні ільменіт, апатит, бастнезит, бритоліт, магнетит, ортит, паризит, флюоріт та інші мінерали. Головними рудними мінералами є бритоліт та циркон. Загальний вміст рідкісноземельних елементів в окремих рудних тілах змінюється від 0,07 до 1,24% [33]. Попри те, що родовище вважається потужним, глибина

залягання рудних тіл понад 500 м значно ускладнює його перспективи для розробки. Потенційно воно може бути джерелом глиноземної сировини з супутнім виділенням рідкісноземельних елементів, циркону, польових шпатів та флюориту.

На заході Приазов'я знаходиться Успенівський прояв, що відноситься до пегматитів та пегматоїдних гранітів альбітизованих крайових ділянок інтрузивних масивів. Товща рудних тіл варіюється від кількох сантиметрів до 59 м, при цьому глибина залягання може сягати до 300 м. Рудний прояв представлений ксенотим-циртоліт-уранінітовими асоціаціями за мінеральним складом. Кора вивітрювання на глибинах до 100 м, містить до 34 г/т монациту та до 5,45 кг/т ксенотиму, але має підвищену радіоактивність [25]. Цей прояв є перспективним за наявністю ряду елементів, таких як ітрій, церій та неодим, а наявність уранініту та циртоліту свідчить про супутній вміст урану та торію, що підвищує стратегічну цінність обє'кту для комплексного видобутку критичної сировини.

Рудна зона, що розсікає метаморфічні породи та анадольські граніти на південний схід від Мазурівського родовища, формує Анадольське родовище. Структура зони характеризується жильно-прожилковою мінералізацією флюориту, апатиту, ортиту, в якій середній вміст TR2O3 становить 9,23%. Серед рідкісноземельних мінералів виявлені апатит, флюорит, ортіт і церіот [34]. Перші два елементи формують в смугастих рудах тонкі прошарки з ортитом та відносяться до церієвих різновидів за хімічним складом. Відповідно до геолого-економічних ознак, дане родовище можна віднести до перспективних об'єктів із високою ресурсною забезпеченістю.

Петрово-Гнутівський прояв знаходиться у долині р. Кальміус (на північному сході від м. Маріуполь) і пов'язане з флюорит-рідкісноземельно-карбонатною жилою потужністю до 3 м, що залягає у фенітизованих граносієнітах Кальміуського масиву. Жила має круте падіння, складена агрегатами кальциту, бастнезиту, паризиту та флюориту. Основними рудними мінералами є бастнезит і паризит, які утворюють зростки з кальцитом у вигляді

гнізд та блоків (0,6–0,8 м). Вміст фторкарбонатів рідкісноземельних елементів досягає 15–20%, TR2O3 досягає 62,6% у бастнезиті та 52,3 % у паризиті [27].

Рідкісноземельна мінералізація, пов'язана з польовошпатовими метасоматитами, виявлена у Кіровоградському урано-рудному районі, зокрема в межах Лозуватського, Калинівського та Південного родовищ. Тут сформувалися як альбітитові, так і натрій-фосфорові метасоматити з уран-торій-ітрієво-рідкісноземельною мінералізацією, що представлена малаконом, циртолітом, монацитом, ортітом, ксенотимом, а також апатитом [34]. Окремо необхідно відзначити запаси скандію, історично його освоєння розпочалося з розробки Жовторіченського родовища в межах Криворізького залізорудного басейну. Запаси скандію в його межах оцінюються в 900 т (із середнім вмістом 105 г/т) та концентрується у егірині та лужних амфіболах, що зосереджені у зонах розломів. Присутні у промислових концентраціях також ванадій, ітрій, цирконій тощо. У цій же північній частині Криворізького залізорудного басейну, виявлено більш однорідне (на відміну від Жовторіченського родовища) ванадій-скандієве зруденіння у межах Першотравневого родовища залізистих кварцитів із головним мінералом-концентратором егірином та вмістом скандію у рудах до 83 г/т, ванадію – 742 г/т. За генезисом обидва родовища відносяться до гідротермально-метасоматичних. Аналогічно до Першотравневого родовища, на Ганнівському родовищі скандієві руди пов'язані із зональними тілами натрієвих метасоматитів, де середній вміст скандію складає 79 г/т, а ванадію 701 г/т [25, 34].

Серед рідкісноземельних та ітрієвих об'єктів, особливий інтерес становить прояв Балка Корабельна (Остапівське, Побузький урановорудний район УЩ), що відноситься до поля розвитку гранітоїдів. Гранітами та пегматитами представлені рудні тіла. Поклад сягає довжини 70 м, ширини 40 м та потужності від 3,5 до 20,2 м при глибині залягання до 50 м. Рудна маса утворена дрібнозернистими вкрапленнями та скупченнями монациту, ксенотиму й апатиту у породі, представленій біотитом, польовим шпатом та кварцом з другорядними альмандином і магнетитом. Основними рудними мінералами є

монацит і ксенотим, другорядними циркон, апатит та уранініт. Вміст TR2O3 в рудних тілах змінюється від 0,22 до 1,51 % [31]. РЗЕ-фосфати зосереджені у біотитових ділянках порід, які зазнали мікроклінізації. Вони формують зернисті агрегати та прожилки, що локалізуються поблизу тріщин або на контактах із мікрокліном.

У зв'язку з карбонатними й лужними комплексами Українського щита варто також зазначити низку родовищ і об'єктів потенційних джерел рідкісноземельних елементів Придніпров'я та Побужжя: пірохлор-гатчетолітове родовище Малотерсянське, берилієве Пержанське родовище з рідкісноземельною мінералізацією, Проскурівський та Антонівський масиви.

Окрім корінних родовищ, в Україні також відомі значні титан-циркон-ільменітові розсипи, зокрема в межах Житомирської області та Приазов'я, які можуть розглядатися як додаткове джерело рідкісноземельної сировини. Середній вміст монациту в цих об'єктах коливається в межах 120–144 г/т (для Волині) до 450–900 г/т (у Приазов'ї).

Треба відзначити Федорівське родовище (Житомирська область) титанових руд (див. рис. 5), що представлені ільменітом та рутилом з домішками ванадію, апатиту та рідкісноземельних елементів (церій, лантан, неодим, празеодим тощо), належить до стратегічних об'єктів мінерально-сировинної бази України. Це зумовлює можливість вилучення супутньої цінної сировини паралельно з титановою продукцією. Попередні геолого-економічні оцінки (зафіксовані корінні запаси руд в обсязі близько 171 млн т), надають підстави віднести Федорівське родовище до потенційних об'єктів комплексного освоєння РЗЕ [35].

Також Малишевське (в деяких джерелах - Музиківське) родовище у Дніпропетровській області є одним з найбільших родовищ ільменіт-рутил-цирконових пісків в Україні, що є джерелом титану, цирконію, а також потенційно рідкісноземельних елементів (танталу, ніобію, ітрію, церію, неодиму тощо). Зокрема в родовищі зафіксовано підвищений вміст гафнію та супутніх елементів, таких як фосфор, ітрій, присутні лантаноїди, уран та торій [25, 33].

Перспективними вважаються ільменіт-апатитове та титаномагнетитове Стремигородське, Торчинське родовища (Житомирська обл.), із середнім вмістом скандію до 0,015%, ільменітові та рутил-циркон-ільменітові розсипні Злобичське, Малишевське та Іршанське родовища, із вмістом скандію до 0,01%, ресурси яких здатні забезпечити виробництво скандієвмісних концентратів.

Скандій виявлений у золі вугільних шахт Луганської області, з середнім вмістом 74-90 г/т, та загальними запасами 18,7 тис. т (без врахування інших елементів). Крім того, скандій виявлений у гідрогетит-ферримонтморилонітових оолітових залізних рудах Керчі з вмістом 7-11 г/т, а також у мартитових і гетит-гідрогетитових кварцитах Криворіжжя із середнім вмістом 1-3 г/т [25]. При розробці систематизації родовищ легких та важких рідкісноземельних елементів України за оцінкою Європейської комісії розглянуто найбільш перспективні з перелічених (Табл. 4.2).

Таблиця 4.2. Наявність покладів легких і важких рідкісноземельних елементів у осадових і корінних циркон-ільменітових родовищах України

№	Регіон	Родовище	Тип РЗЕ	Основні елементи	Тип руд
1	Житомирська обл.	Іршанське	Легкі	Церій, лантан, неодим	Титано-цирконієві
2	Дніпропетровська обл.	Малишевське	Легкі	Неодим, празеодим	Ільменіт-апатитові
3	Приазов’я	Азовське	Важкі	Диспрозій, тербій	Рідкіснометалеві
4	Полісся	Сушанське	Важкі	Ербій, ітербій	Складні за мінералогією поклади
5	Черкаська обл.	Смілянське	Легкі+важкі	Церій, неодим, ітербій	Розсипні титано-цирконієві
6	Дніпропетровська обл.	Мотронівське	Легкі+важкі	Лантан, диспрозій	Високий потенціал, не освоєне

Варто підкреслити, що рідкісноземельні елементи зосереджені в корінних та осадових (розсипних) родовищах легких (лантан, церій, празеодим, неодим) та важких РЗЕ (тербій, диспрозій, ербій та ітербій). Розташовані вони безпосередньо в межах Приазовського, Волинського та Поліського регіонів, а

також у Дніпропетровській та Житомирській областях. Вони представлені у вигляді ізоморфних домішок, що є складовою частиною ільменіт-апатитових та титано-цирконієвих руд.

На Приазовському блоці виявлені великі родовища рідкісних та рідкісноземельних металів (Мазурівське та Азовське циркон-рідкіснометалічні). Особливо перспективними слід виділити Жовторічинське скандій-ванадієве, Новополтавське апатит-рідкісноземельне, Ястребецьке флюорит-циркон-рідкісноземельне, Федорівське, Стремигородське Крапивеньківське та Видиборзьке апатит-титаномагнетит-рідкіснометалічні родовища.

Рідкісні родовища не утворюють власні мінерали, а присутні у вигляді домішок відомих руд. Для вилучення РЗЕ з основних руд необхідно видобути та переробити значні обсяги порід. Особливістю наведених вище родовищ є їх комплексність, тобто поряд з основною корисною копалиною видобуваються і супутні, що представлені РЗЕ. Економічна доцільність комплексного освоєння таких родовищ при правильному підході підвищується в рази.

В межах України наявні значні поклади корінних руд, вилучення РЗЕ з яких передбачає виконання складних технологічних процесів: розпушення масиву скельних порід, подрібнення, отримання цінних елементів. Відповідно до відкритих джерел інформації встановлено вміст легких РЗЕ церію, лантану, неодиму, празеодиму і самарію, а лише одного важкого РЗЕ – ітрію (рис. 4.7).

Відповідно до аналізу розподілу легких і важких РЗЕ у корінних родовищах України (рис. 4.7), з їх загального вмісту найбільша частка представлена легкими елементами – церієм (до 28 % родовищ), лантаном (до 21 % родовищ) та неодимом (до 18 % родовищ). У тих же родовищах із загальної частки елементів вміст ітрію (важкий РЗЕ) не перевищує 3 %, а решта елементів потребує додаткового вивчення. До корінних родовищ з найбільшими запасами відносяться Музиківське та Стремигородське. Варто зазначити, що вилучення легких і важких РЗЕ потребують багатоступеневих процесів збагачення: флотації, сорбції та іонного обміну.

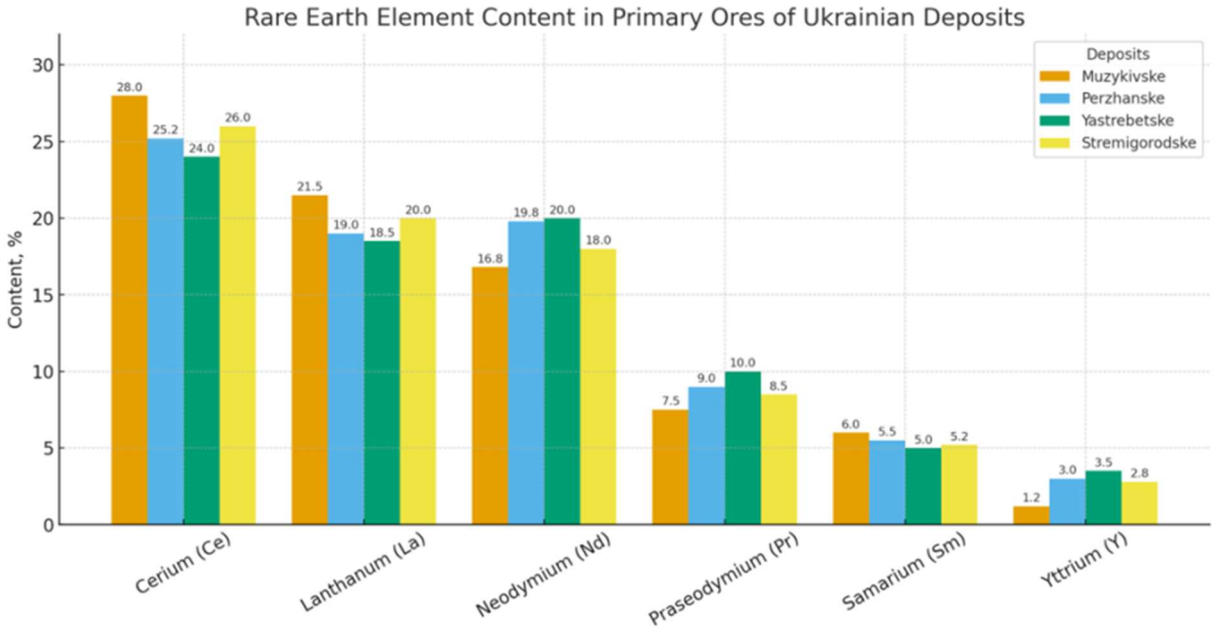


Рис. 4.7. Розподіл основних рідкісноземельних елементів в рудах корінних родовищ України

Стремигородське корінне родовище рідкісноземельних елементів України є одним з найбільших в Європі та світі. Його зруденіння простягається до 1,5 км в глибину, що передбачає застосування комбінованого відкрито-підземного способу розробки, коли верхня частина покладу розкривається та відпрацьовується за допомогою системи відкритих гірничих виробок, а нижня глибинна – підземних. Високі капітальні витрати на освоєння цього родовища можуть бути компенсовані завдяки значним об’ємам корисних копалин, комплексному освоєнню основної та супутньої сировини, а також великим терміном експлуатації кар’єру. У той же час, значною проблемою для застосування комплексного освоєння корінних і осадових родовищ руд рідкісноземельних елементів є недостатня вивченість покладів та недостатня геологорозвідка. Тобто на стадії отримання ліцензії на певну ділянку у інвестора на сьогодні є відсутнім стратегічне бачення, щодо освоєння цих критичних покладів. Вирішення цієї проблеми в подальшому забезпечить створення нових робочих місць, наповнення бюджетів усіх рівнів, а також розвиток стратегічних галузей економіки.

До перспективних розсипних родовищ відносяться Мотронівське, Малишевське, Іршанське та Смілянське, в покладах яких попередніми дослідженнями була встановлена наявність низки легких та важких РЗЕ (рис. 4.8).

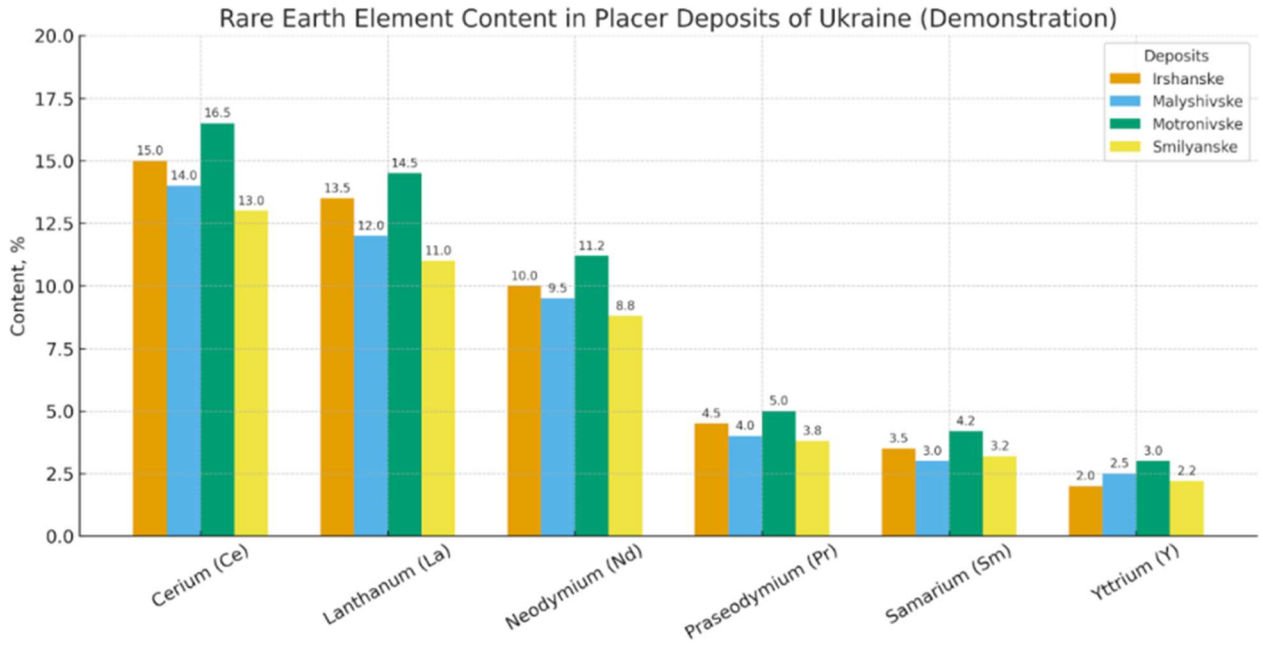


Рис. 7. Розподіл основних рідкісноземельних елементів в рудах розсипних родовищ України

Відповідно до аналізу розподілу РЗЕ у розсипних родовищах (рис. 4.8) встановлено, що із загального вмісту легких РЗЕ в руді найбільша частка представлена церієм (до 16 %), лантаном (до 14 %) і неодимом (до 11 %), а вміст ітрію не перевищує 3 %. До розсипних родовищ з найбільшими запасами відносяться Мотронівське та Іршанське.

Як і у випадку з розробкою корінних родовищ рідкісноземельних елементів, освоєння розсипних родовищ має базуватися на комплексному підході вилученням основної титан-цирконієвої сировини, а також супутніх елементах РЗЕ у руді. Такий підхід значно підвищить техніко-економічні показники розробки розсипних родовищ, а також додатково будуть зменшені відходи виробництва і підвищиться рівень циркулярності технологій освоєння.

Оскільки скандій за оцінкою Європейської комісії не відноситься до легких або важких РЗЕ і позиціонується окремо, родовища з його вмістом розглянуті окремо.

До великої скандієві аномалії можна віднести дві потужні титанові структури: Коростенську та Корсунь-Новомиргородські плутони. Технологічні рішення щодо освоєння подібних родовищ відомі але промислова інфраструктура для ефективного вилучення скандію з руд в Україні відсутня. Однією з основних причин є низький вміст елементу в рудах та висока вартість технологічного процесу, що обумовлює економічну недоцільність видобутку скандію.

Виконаний аналіз ресурсної бази родовищ РЗЕ України, а також урахування великого попиту в світі на цю критичну сировину, обумовлює необхідність використання найкращих світових практик і технологій розробки. Разом з виконанням додаткових геологорозвідувальних робіт, такі дії дозволять розширити ланцюги постачальників сировини та споживачів готової продукції, забезпечуючи диверсифікацію на світових ринках.

В Україні на сьогодні розробляються науково-технологічні рішення щодо застосування маловідходних методів вилучення РЗЕ. Серед перспективних методів слід виділити використання мембранних технологій та біосорбентів, що призводять до зменшення витрат реагентів та негативного впливу на навколишнє середовище.

Таким чином, Україна володіє ресурсами легких та важких РЗЕ, однак для початку промислового освоєння необхідного пройти суттєвий шлях, що полягає у створенні сучасної геологічної бази даних, розробки та впровадження новітніх технологій збагачення, залучення інвестицій з розвитком прозорого ринку та організації замкнутого виробничого циклу “видобуток – переробка – виробництво”. Реалізація цих заходів дозволить Україні стати одним з гравців на світовому ринку РЗЕ та стимулюватиме розвиток наукоємних галузей економіки.

Визначено, що до корінних родовищ з найбільшими запасами відносяться Музиківське та Стремигородське, в яких найбільший вміст легких РЗЕ в руді

представлений церієм, лантаном та неодимом. Встановлено, що до розсипних родовищ з найбільшими запасами відносяться Мотронівське та Іршанське, в яких із загального вмісту легких РЗЕ в руді найбільша частка представлена церієм, лантаном і неодимом. В корінних і розсипних родовищах із загальної частки РЗЕ вміст ітрію не перевищує 3 %, а решта елементів потребує додаткового вивчення.

Таким чином можна стверджувати, що Україна має достатній потенціал в освоєнні легких і важких РЗЕ проте для ефективного залучення їх в експлуатацію необхідне створення сучасної геологічної бази даних, розробка та впровадження новітніх технологій збагачення, залучення інвестицій з розвитком прозорого ринку та організація замкнутого виробничого циклу.

Контрольні запитання:

1. За якими хімічними та кристалографічними ознаками рідкісноземельні метали (РЗЕ) поділяють на групи легких (LREE) та важких (HREE) елементів?
2. Які історичні та економічні чинники зумовили сучасну географічну концентрацію світового виробництва РЗЕ та монопольний стан окремих країн на ринку?
3. У яких типах геологічних ендогенних та екзогенних родовищ найчастіше залягають рідкісноземельні елементи і в складі яких головних мінералів вони акумулюються?
4. Чому гірничо-геологічні умови видобутку та подальшої переробки рідкісноземельних руд вважаються одними з найскладніших у видобувній галузі?
5. Які базові технологічні етапи (від флотаційного збагачення руд до рідинної екстракції) включає процес розділення суміші РЗЕ на індивідуальні чисті метали?
6. Які головні екологічні ризики та проблеми супроводжують промислове освоєння та хіміко-металургійну переробку рідкісноземельної сировини?
7. Які геологічні структури та родовища в Україні мають найбільший перспективний потенціал для промислового освоєння легких і важких РЗЕ?

Список рекомендованої літератури до розділу 4.

1. Guyonnet, D., Planchon, M., Rollat, A. (2015). Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe. Journal of Cleaner Production, 107, 215-228. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.123

2. Jowitt, S. M., Werner, T. T., Weng, Z., & Mudd, G. M. (2018). Recycling of the rare earth elements. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *13*, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.008

3. Suli, L. M., Ibrahim, W. H. W., Aziz, B. A., Deraman, M. R., & Ismail, N. A. (2017). A review of rare earth mineral processing technology. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 20-35. https://doi.org/10.3329/cerb.v19i0.33773

4. Sims, Z. C., Kesler, M. S., Henderson, H. B. (2022). How cerium and lanthanum as coproducts promote stable rare earth production and new alloys. *Journal of Sustainable Metallurgy*, *8*(3), 1225-1234. https://doi.org/10.1007/s40831-022-00562-4

5. Mariscal-Becerra, L., Acosta-Najarro, D., Falcony-Guajardo, C., & Murrieta Sanchez, H. (2018). Luminescent and structural analysis of yttrium oxide doped with different percentages of terbium and dysprosium, to obtain different shades of green to yellow. *Journal of Nanophotonics*, *12*(2), 026018-026018. https://doi.org/10.1117/1.JNP.12.026018

6. Zhao, G., Geng, Y., Wei, W., Bleischwitz, R., & Ge, Z. (2023). Assessing gadolinium resource efficiency and criticality in China. *Resources Policy*, *80*, https://doi.org/103137.10.1016/j.resourpol.2022.103137

7. Rice, P., & Somani, B. K. (2021). A systematic review of thulium fiber laser: applications and advantages of laser technology in the field of urology. *Research and Reports in Urology*, 519-527. https://doi.org/10.2147/RRU.S233979

8. Wang, W., & Cheng, C. Y. (2011). Separation and purification of scandium by solvent extraction and related technologies: a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, *86*(10), 1237-1246. https://doi.org/10.1002/jctb.2655

9. Lozhnikov O., Pavlychenko A., Shustov O., Dereviyagina N. (2024). Prospects for the lithium deposits development in Ukraine. *Mineral Resources &*

Energy Congress (SEP 2024). E3S Web Conf. Volume 526, 2024. 01001. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601001

10. Lozhnikov, O., Pavlychenko, A., Shustov, O., & Dereviahina, N. (2024). The current state and development prospects of the graphite industry of Ukraine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1415, 012122. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012122

11. Vasylenko A.P., Isakov L.V. (2018). Pegmatites as a source of rare-metal and rare-earth mineralization within the central and western parts of the Ukrainian Shield, 4, 8-11. https://doi.org/10.31996/mru.2018.4.8-11

12. Naumenko, U., Matsui, V., & Naumenko, O. (2024). Research and application of unique and rare earth elements in Ukraine: the way to innovation and sustainable development. https://doi.org/10.15407/gb2607

13. Mykhailov, V. A., Hrinchenko, O. V., & Malyuk, B. I. (2023). Exploration and mining perspectives of the critical elements for green technologies in Ukraine. https://doi.org/10.1144/SP526-2021-133

14. Liventseva, H. (2022). The mineral resources of Ukraine. Tierra y Tecnología. URL: https://www. icog. es/TyT/index. php/2022/05/the-mineral-resources-of-ukraine/(date of access: 08.10. 2023). https://doi.org/10.21028/hl.2022.05.17

15. Sanglier-Contreras, G., Iglesias-Sanz, C. M., Gonzalez-Lezcano, R. A., & López Fernández, E. J. (2025). Rare earths and international politics: the impact of the war in Ukraine on the global trade of critical minerals. Mineral Economics, 1-11. https://doi.org/10.1007/s13563-025-00566-y

16. Maslak, O., Hlazunova, O., Maslak, M., Grishko, N., Pochtoviuk, K., & Szabolcs, N. (2023). Balance of the Rare-Earth Elements Market: Prospects for the Development of Green Energy. In 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) (pp. 1-5). IEEE. https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402447

17. Cuadros-Muñoz, J. R., Jimber-del-Río, J. A., Sorhegui-Ortega, R., Zea-De la Torre, M., & Vergara-Romero, A. (2024). Contribution of rare earth elements is key

to the economy of the future. *Land*, *13*(8), 1220. https://doi.org/10.3390/land13081220

18. Taglieri, L., & Fratocchi, L. (2025). Made in Europe Recovery of Rare Earth Elements: Is a Circular and Sustainable Value Chain Really Possible?. *IFAC-PapersOnLine*, *59*(10), 1510-1515. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.254

19. *U.S. Rare Earths Industry in 2024: Growth, Challenges, and Global Context* (2024). Retrieved from https://rareearthexchanges.com/news/rare-earth-supply-chain-18/

20. Zhou, B., Li, Z., Zhao, Y., Zhang, C., & Wei, Y. (2016). Rare Earth Elements supply vs. clean energy technologies: new problems to be solve. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 32(4), 29-44. https://doi.org/10.1515/gospo-2016-0039

21. Mineral Commodity Summaries (2025). *U.S. Geological Survey*, 156-156. https://doi.org/10.3133/mcs2025

22. Rare Earth prices (2025). Retrieved from https://www.metal.com/prices/Rare-Earth

23. Thulium(III) oxide (2025). Retrieved from https://www.sigmaaldrich.com/UA/en/product/aldrich/204676

24. Rare Earth Oxides Market (2024). Retrieved from https://datahorizzonresearch.com/rare-earth-oxides-market-42661

25. Рудько Г. І., Литвинюк С. Ф., Карли В. Е., Бала Г.Р. (2021). Родовища критичної мінеральної сировини України. Стан і перспективи /за ред. Г. І. Рудька. Київ-Чернівці: Бурек, 248 с. ISBN 978-966-997-074-9

26. Рудько Г. І., Бала Г.Р. (2021). Мінеральна сировина та її перспективи в Україні. Мінеральні ресурси України, No 2, с. 3-14. https://doi.org/10.31996/mru.2021.2.3-14

27. Михайлов, В., Курило, М., & Кошарна, С. (2021). Геолого-промислова оцінка та ранжування перспективних об'єктів вітчизняної бази рідкісноземельних елементів. *Вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Геологія*, (2), 32-40. http://doi.org/10.17721/1728-2713.93.04

28. Курило, М., Кошарна, С. (2024). Стратегічне значення рідкісноземельних елементів для сучасних технологій та перспективи

вітчизняних родовищ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, (1), 63-69. https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.08

29. Kulchytska, H. O., Ponomarenko, O. M., Pavlyshyn, V. I., & Chernysh, D. S. (2025). Мінерали рідкісноземельних елементів у надрах України як складова інвестиційної привабливості для Європейського Союзу. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (3), 71-82. https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.03.071%20

30. Bayan Obo Rare Earth Mine. Джерело: https://www.nsenergybusiness.com/projects/bayan-obo-rare-earth-mine/

31. Karly, Z. V., Bondarenko, S. M., Somka, V. O., Stepaniuk, L. M., Somka, L. V. (2019). Mykolaivske Ore Occurrence of REE-U-Th Mineralization in the Bug Uranium Ore Region of Ukrainian Shield. *Mineralogical journal*, 41 *(3)*, 65-81. http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001044855

32. Гулай О., Шемет В., Фурс Т. (2022). Рідкісноземельні метали як критична сировина. Короткий огляд. Праці НТШ. Хімічні науки, Т. LXX. 79-89. https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2022.70.079

33. Бабій К.В., Бубнова О.А., Малєєв Є.В., Рюміна Д.М., Левченко К.С., Ікол О.О. (2024). Ресурси стратегічних корисних копалин України: монографія. – Дніпро: ПБП «Економіка», 324 с.

https://www.researchgate.net/publication/390199010_Resursi_strategicnih_korisnih_kopalin_Ukraini

34. Шеремет Є.М., Кривдік С.Г., Стрекозов С.М. (2017). Перспективи виявлення рідкісноземельних родовищ «Анадольського типу» в Приазов'ї (Україна) Мінералогічний журнал, 39 (3), 85-101. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.03.085

35. Охоліна Т., Кузьманенко Г., Мережко М. (2025). Перспективи України у сфері критичних мінералів: геологічна характеристика Видибірського та Федорівського родовищ апатит-ільменітових руд. Collection of materials of the twelfth scientific-practical conference «Mineral resources of Ukraine: ways of optimal use», Khoroshiv, 75-79. https://doi.org/10.59911/978-617-95457-7-1.2025.12

РОЗДІЛ 5. ОСВОЄННЯ КРИТИЧНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ З МЕТАЛОЇДІВ

У розділі наводиться інформація про сучасний стан освоєння критичної мінеральної сировини з металоїдів. При опануванні викладеного матеріалу здобувач повинен: розуміти подвійну природу металоїдів як хімічних елементів із проміжними фізико-хімічними властивостями та їхню базову роль як напівпровідників у мікроелектроніці; засвоїти технологічні цикли виробництва кремнію, які включають відновлення діоксиду кремнію в руднотермічних печах та подальше глибоке хімічне очищення продукту для використання у напівпровідниках; оцінювати потужний сировинний потенціал України щодо кремнію; усвідомлювати геохімічний статус германію як розсіяного елемента, мінерали якого є вкрай рідкісними, через що головним джерелом його промислового отримання виступають побічні продукти переробки руд і вугілля.

5.1. Основні відомості про металоїди

Металоїди – це хімічні елементи, які мають проміжну поведінку та поєднують у собі властивості як металів, так і неметалів. Тому в деяких джерелах вони мають назву напівметали. Вони розташовані в періодичній системі елементів між металами і неметалами, розділяючи ці дві великі групи (рис. 5.1). Фізично металоїди зазвичай виглядають як метали – вони тверді та мають характерний блиск, але за своїми хімічними ознаками вони ближчі до неметалів і є крихкими.

Найважливішою особливістю металоїдів є їхня здатність працювати як напівпровідники, тобто проводити електричний струм лише за певних умов. Завдяки цій унікальній властивості такі елементи, як кремній та германій, стали основою для виробництва сучасної мікроелектроніки, комп’ютерних чипів та сонячних батарей. Переконливі перспективи використання цих двох елементів пов’язані зі зростаючим попитом на процесори для штучного інтелекту, квантові комп’ютери та відновлювану енергетику.

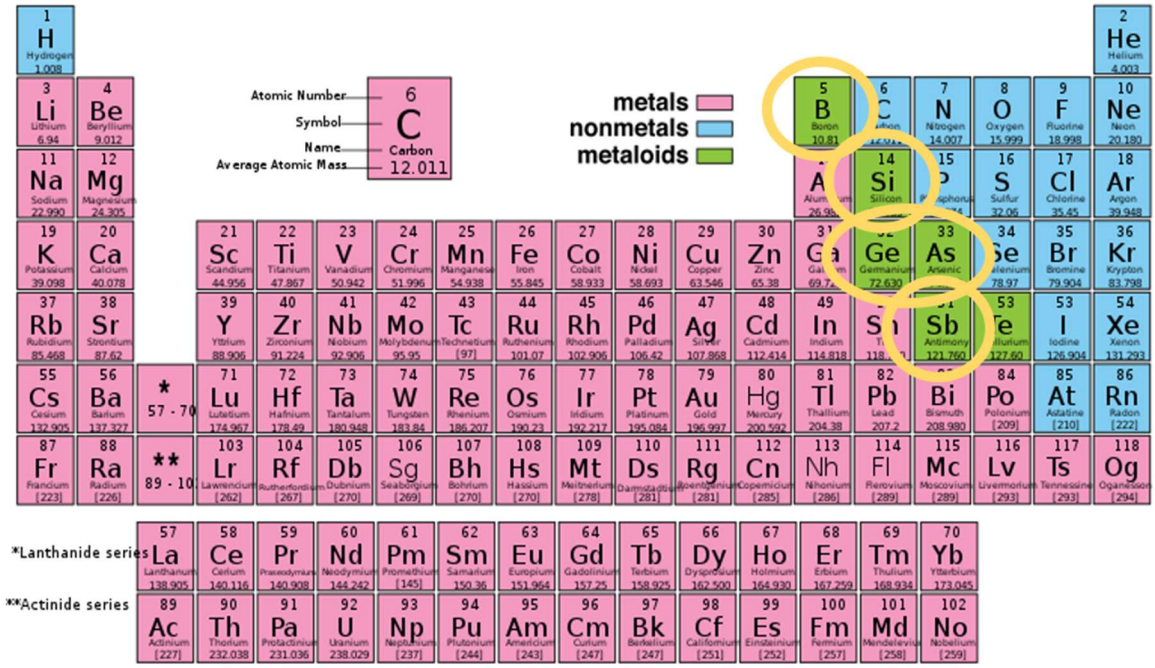


Рисунок 5.1. Металоїди у періодичній системі хімічних елементів [1]

Завдяки унікальним проміжним властивостям між металами й неметалами, вони є незамінними у виробництві високоефективних сонячних панелей та сучасних сенсорів. Глобальний ринок знаходиться у пошуках нових родовищ та вдосконалює методи очищення цих елементів для зменшення залежності від домінуючих країн постачальників.

Розглянемо усі металоїди, що відносяться до критичної мінеральної сировини.

5.2. Бор/борат

У вільному стані в природі бор не зустрічається. Попри те, що його кларк у земній корі є досить низьким і становить лише 3×10^{-4} % (або 3 г/т), науці відомо понад 100 власних мінералів цього елемента.

Бор практично не входить до складу «чужих» мінеральних структур. Це зумовлено відсутністю поширених аналогів у комплексних аніонів бору, у формі яких він найчастіше й існує. У більшості сполук цей елемент хімічно зв’язаний із киснем (утворюючи борати та боросилікати), тоді як фторовмісна група є

вкрай нечисленною. Бор присутній у багатьох осадових і вулканічних породах переважно у вигляді ізоморфних домішок чи низьких концентрацій, а також міститься у морській воді та пластових водах нафтових родовищ. Одержаний у чистому вигляді метал та його похідні сполуки мають стратегічне значення для ядерної енергетики, виробництва спецскла та ракетної техніки.

Розробка бору здійснюється переважно шляхом відкритого видобутку (рис. 5.2) його головних мінералів, таких як керніт та бура. Збагачення боровмісних руд спрямоване на підвищення вмісту корисного компонента і включає процеси дроблення, промивки та гравітаційного розділення. Для руд із низьким початковим вмістом додатково застосовують флотацію або магнітну сепарацію для видалення домішок. Кінцевий хімічний концентрат отримують за допомогою кристалізації або розчинення під дією кислот.



Рис. 5.2. Кар’єр з розробки бору у Каліфорнії, США [2]

На даному кар’єрі (рис. 5.2) видобувається понад 30–40% світового об’єму очищених боратів, виробляючи близько 1 мільйона тонн готового матеріалу на рік.

На відміну від кремнію чи літію, родовища бору та боратів (борна сировина) в Україні недостатньо вивчені. Якщо за запасами кремнію Україна є одним із європейських лідерів, то власна мінерально-сировинна база бору практично відсутня у вигляді класичних промислових родовищ. В Україні немає

розвіданих та затверджених Державним балансом родовищ власне борних руд. Невеликі мінеральні прояви бору фіксуються як супутні елементи в деяких гранітоїдах та пегматитах із занадто низькою концентрацією.

5.3. Кремній (металевий)

Кремній є другим за поширеністю елементом на планеті, поступаючись лише кисню і становлячи 27,6% від маси земної кори. Проте в самородному стані як проста речовина в природі він не трапляється. Для потреб сучасної індустрії – передусім для виробництва електронних компонентів та напівпровідникових приладів – його масово синтезують штучним шляхом.

Базою для більшості гірських порід є найпоширеніші сполуки цього елемента: силікати (солі силікатної кислоти) та кремнезем (діоксид кремнію, [SiO_2]). Крім того, мікрокількості кремнієвих сполук зафіксовані в рослинних організмах. Близько 12% літосфери сформовано кварцом та його мінералогічними відмінами, а ще 75% припадає на різноманітні силікати й алюмосилікати, серед яких переважають слюди, польові шпати та амфіболи.

Видобуток кремнію починається з відкритої розробки родовищ кварциту або високочистого кварцового піску, які слугують основною сировиною (рис. 5.3).

Після видобутку сировину збагачують шляхом подрібнення, промивання та магнітної сепарації, щоб максимально очистити її від небажаних домішок. На етапі виплавки очищений діоксид кремнію змішують із вуглецем (коксом, вугіллям або тріскою) і відновлюють у потужних руднотермічних печах за температури понад 1900 °C.

Отриманий рідкий технічний кремній зливають у форми, охолоджують і подрібнюють, досягаючи чистоти продукту близької до 99%. Для потреб електроніки та сонячної енергетики цей метал піддають додатковому глибокому хімічному очищенню, перетворюючи його на високочистий полікристалічний або монокристалічний кремній. Аморфний кремній можна одержати нагріванням діоксиду кремнію з магнієм.



Рис. 5.3. Кар’єр з розробки піску та гравію з високим вмістом діоксиду кремнію [3]

У процесі обробки хлоридною кислотою оксид магнію переходить у розчин, що дозволяє виділити чистий кремнієвий порошок. Аморфна модифікація кремнію добре розчиняється в рідкому алюмінії або цинку, а під час їхнього охолодження кристалізується. Отримані кристали легко відокремити: оскільки кремній інертний до хлоридної кислоти, достатньо просто розчинити в ній цинк чи алюміній.

У промислових масштабах технічний кремній синтезують шляхом високотемпературного відновлення діоксиду кремнію вугіллям в електричних печах. Водночас для потреб чорної металургії зазвичай виготовляють його сплав із залізом – феросиліцій. Його отримують в електропечах методом прожарювання шихти, яка складається з кокса, залізної руди та діоксиду кремнію.

Україна має сировинний потенціал для виробництва кремнію, який зафіксований на державному рівні та є важливою складовою європейської стратегії розвитку критичної сировини.

За оцінками UkraineInvest [4], у надрах країни зосереджено близько 180 мільйонів тонн розвіданих запасів кремнієвих кварцитів, а загальні перспективні поклади оцінюють у понад 500 мільйонів тонн. Це робить Україну однією з найбагатших на кремнієву сировину країн Європи.

Кремній в Україні залягає у кварцитах, кристалічному кварці та кварцових пісковиках із надзвичайно високим вмістом діоксиду кремнію (SiO_2) – до 99%. Основні родовища кремнію в України – Баницьке, Овруцьке та Товкачівське, а також Малоскелюватське.

Баницьке родовище (Глухівський кар'єр) на Сумщині, яке є унікальним за чистотою кварцитоподібних пісковиків (вміст кремнію понад 99%). Саме ця сировина підходить для отримання високочистого кремнію сонячної та напівпровідникової якості. Овруцьке та Товкачівське родовища кристалічних кварцитів (Житомирська область) є одними з найбільших у Європі, що забезпечують видобуток мільйонів тонн сировини для металургії та сплавів. Малоскелюватське родовище високоякісних кварцитів у Кіровоградській області України розробляється відкритим способом і забезпечує сировиною скляну та будівельну промисловості.

5.4. Германій

У вільному стані в природі германій не зустрічається. Його вміст у земній корі становить приблизно 1,5 г/т (1,5 мільйонних частин), що відводить йому 55-те місце за рівнем поширеності. Попри те, що германію на планеті значно більше, ніж срібла, золота, ртуті чи йоду, його власні мінерали трапляються вкрай рідко через приналежність до типових розсіяних елементів.

Науці відомі такі мінеральні форми цього металу, як германіт, аргіродит і реньєрит, проте їхні мізерні запаси не здатні покрити промисловий попит. Найчастіше германій присутній як ізоморфна домішка в мінералах кремнію, і значно рідше – у сполуках цинку, заліза та свинцю. Крім того, завдяки здатності накопичуватися в рослинних організмах, цей елемент часто виявляють у покладах кам'яного та бурого вугілля.

Головним джерелом отримання германію є супутні продукти переробки цинкових руд та попіл від спалювання кам’яного вугілля. Збагачення сировини відбувається хімічними та термічними методами, оскільки через розсіяність елемента традиційна механічна сепарація є неефективною. На етапі хімічного виділення германій перетворюють на леткий тетрахлорид германію ($GeCl_4$), який відокремлюють за допомогою фракційної дистиляції.

Очищений хлорид піддають гідролізу для одержання діоксиду германію (GeO_2), який згодом відновлюють воднем або вуглецем за високої температури до металевого стану. Отриманий технічний метал очищають методом зонної плавки, що дозволяє досягти надвисокої чистоти, необхідної для високотехнологічних галузей.

У світі немає гірничих підприємств, де основною товарною сировиною є саме германій. Через свої геохімічні властивості германій є класичним розсіяним елементом, який не утворює самостійних промислових родовищ або власних рудних тіл. Будь-який його видобуток на планеті прив’язаний до інших металів або копалин. Основними підприємствами з вилучення германію є свинцево-цинкові рудники, де він видобувається супутньо з мінералу сфалериту. Також значні об’єми германію отримуються на вугільних розрізах та ТЕС, завдяки накопиченню у деяких пластах лігніту та кам’яного вугілля (рис. 5.4).



Рис. 5.4. Германій [5]

Україна має винятковий сировинний потенціал для того, щоб стати одним із провідних гравців на європейському ринку германію. Державний баланс корисних копалин України включає понад 200 об'єктів із підрахованими запасами цього металу, де він залягає як супутній компонент. За оцінками геологів, ресурсна база українського германію становить понад половину від обсягів усіх пострадянських країн.

Германій може бути отриманий з кам'яного вугілля Західного Донбасу. Особливо високий вміст германію фіксується у довгополуменевому та газовому вугіллі (Павлоградсько-Петропавлівський та Лозівський райони), де концентрація металу в попелі має високі промислові значення. Другим за значенням басейном із підтвердженою германієносністю вугільних пластів є Львівсько-Волинський вугільний басейн.

Найбільш унікальними в Європі є Біганське (Малобеганське) та Новоселицьке родовища бурого вугілля. Вміст германію тут вважається аномально високим і може сягати від 280 г до 1 кг на тонну. Освоєння цих буровугільних родовищ розглядається науковцями як один із найшвидших шляхів отримання чистого металу.

5.5. Арсен (миш'як)

Арсен рівномірно розподілений по всій планеті як 53-й за поширеністю елемент земної кори і входить до складу понад 200 мінералів. Він є критичною сировиною, оскільки є незамінним у виробництві арсеніду галію (GaAs), який є базовим напівпровідником для швидкісних чипів 5G, військових радарів, лазерів та сонячних панелей космічних апаратів.

Також арсен має критичну важливість для металургії, де його додають для зміцнення спецсплавів оборонного призначення, акумуляторних пластин і кабельних оболонок. При цьому світовий ринок жорстко залежить від Китаю, який контролює понад 70–80% глобального виробництва арсену, що створює високі ризики дефіциту для країн ЄС.

Головним промисловим джерелом отримання арсену є супутні мідно-піритні, золото-арсенові та свинцево-цинкові руди, де він залягає у вигляді мінералу арсенопіриту (FeAsS) або інших сульфідів. Видобуток арсенової сировини здійснюється виключно супутньо під час розробки родовищ кольорових та благородних металів (рис. 5.5).



Рис. 5.5. Видобуток мідних руд з вмістом арсену [6]

Первинне збагачення руди проводять методом флотації, що дозволяє відокремити арсеновмісний концентрат від пустої породи. На етапі металургійної переробки концентрат піддають окиснювальному випалу в печах без доступу кисню, внаслідок чого арсен сублімується у вигляді леткого білого порошку триоксиду арсену (As_2O_3).Отриманий оксид відновлюють вуглецем (коксом) за високої температури у спеціальних ретортах, унаслідок чого виділяється чистий елементарний (металевий) арсен. Для потреб оборонної промисловості та напівпровідникової електроніки (виготовлення арсеніду галію) метал піддають додатковому глибокому рафінуванню методом дистиляції або зонної плавки.

Також існують способи отримання арсену шляхом сублімації природного арсену, термічним розкладанням арсенового колчедану, відновленням арсенового ангідриду.

Сьогодні металевий арсен найчастіше отримують шляхом нагрівання арсенопіриту в муфельних печах без доступу кисню. Під впливом високої температури виділяються пари арсену, які згодом конденсуються у спеціальних залізних трубках та керамічних збірниках, переходячи у твердий стан.

Залишок у печах потім нагрівають при доступі повітря для окислення арсену в As_2O_3. Металевий арсен виходить у досить незначних кількостях, і головна частина арсеновмісних руд переробляється в білий арсен, тобто в триоксид арсену.

В Україні природним ендемічним регіоном поширення арсенвмісних корисних копалин є Рахівсько-Тисовська розломна зона. Зокрема, у річкових та підземних водах басейну Чорної Тиси поблизу села Кваси фіксується підвищений вміст арсену (до 1500 мкг/л). Оскільки стандартні методи централізованого очищення не здатні повністю видалити цей елемент до безпечного рівня, населенню доводиться застосовувати спеціальні системи додаткової фільтрації перед споживанням води.

Мінеральні сполуки та солі арсену також виявлені в гірських породах Криворізького залізорудного басейну, Нагольного кряжа на Донбасі та Чивчинського масиву в Івано-Франківській області. Крім того, значні концентрації арсену у формі сульфідних руд (разом із залізом, міддю, цинком, свинцем, золотом і сріблом) характерні для низки золоторудних об’єктів України, зокрема Бобриківського родовища на Луганщині, Юріївського в Середньому Подніпров’ї та Клинцівського на Кіровоградщині.

Не зважаючи на наявні запаси в Україні промисловий видобуток миш’яку як окремого компонента наразі не ведеться, і країна повністю залежить від імпорту цієї критичної сировини. Проте арсен офіційно внесено урядом до переліку мінералів критичного значення з наявним потенціалом до освоєння.

5.6. Стибій (сурма)

Стибій (сурма) є дуже рідкісним елементом в земній корі, а його частка становить лише від 0,2 до 0,5 мільйонних частин (0,2–0,5 г/т). За своєю

природною поширеністю він займає приблизно 63-тє місце серед усіх елементів, значно поступаючись навіть германію (якого втричі більше). Проте, на відміну від класичних розсіяних металів, стибій має високу здатність концентруватися і утворює понад 100 власних мінералів (найголовніший з яких антимоніт), що дозволяє будувати для його видобутку повноцінні гірничі підприємства.

Промислове виробництво стибію базується на переробці золото-стибієвих, ртутно-стибієвих і власне стибієвих руд. Крім того, його часто вилучають як супутній компонент із вольфрамових, олов'яних та поліметалічних покладів. Якщо вміст стибію в початковій руді не досягає 10%, сировина підлягає обов'язковому попередньому збагаченню. Отримані рудні концентрати надалі переробляють за допомогою пірометалургійних або гідрометалургійних технологій.

У Таджикистані стибій видобувається відкритим способом (рис. 5.6). Річна потужність переробки руди становить 1,5 мільйона тонн, річний випуск 16 тис. тонн стибію та 2,2 тонни золота в зливках.



Рис. 5.5. Видобуток стибію на кар'єрі [7]

Золото-стибієві концентрати можуть видобуватися на шахтах з невеликою продуктивністю, проте вміст металу в цих родовищах є високим. Вилучення сурми з руд залежить від якості і складу руди.

Більшість сурми видобувається як сульфід; руди нижчого вмісту концентруються шляхом пінної флотації, тоді як руди вищого вмісту нагрівають до температури 500–600 °C, при якій стибніт плавиться і відділяється від мінералів пустої породи. Також стибій може бути виділений з сирого сульфіду стибію відновленням залізним брухтом. Сульфід перетворюється на оксид шляхом випалу. Продукт додатково очищається шляхом випаровування леткого оксиду стибію, який виділяється.

Цей сублімат часто використовується безпосередньо для основних застосувань, домішками є арсен і сульфід. Стибій виділяється з оксиду карботермічним відновленням.

В Україні відомі рудопрояви стибію і комплексні стибієво-ртутні рудопрояви та родовища в межах Донецького басейну. Останні розташовані в Микитівському рудному полі й знаходяться разом з ртуттю. З економічної точки зору, як об’єкти промислової розробки сурм’яних руд, вони не мають суттєвого значення. На кожні три тонни ртуті, яка вилучається з руд Микитівського родовища, припадає 2 т сурми, котра потрапляє разом з огарками виробництва ртуті у відвали. Стибієво-ртутні об’єкти приурочені до осадової товщі середнього карбону і є гідротермальними.

Єдиним та найбільш характерним прикладом суто стибієвого зруденіння в регіоні є антимонітова жила, виявлена на Вірівському рудопрояві. Цей об’єкт географічно приурочений до північно-західної частини Ольховатсько-Волинської антикліналі. Вона входить до структури Головної антикліналі Донбасу та на своєму північно-західному краї кулісоподібно замикається з Горлівською антикліналлю.

Контрольні запитання:

1. Яка головна властивість металоїдів визначила розвиток сучасної мікроелектроніки та штучного інтелекті?
2. Які основні методи застосовують для збагачення та хімічної переробки головних борвмісних руд (керніту та бури)?

3. У чому полягає суттєва відмінність між мінерально-сировинною базою бору та кремнію в Україні, та який статус мають затверджені державним балансом запаси борних руд у країні?

4. Які основні технологічні етапи та температурні режими включає процес відновлення технічного кремнію з діоксиду кремнію (SiO_2) у руднотермічних печах?

5. Для яких галузей промисловості технічний кремній чистотою 99% потребує додаткового глибокого хімічного очищення, і за допомогою яких металів можна отримати кристалічний кремній з аморфного?

6. Які родовища формують кремнієвий потенціал України, де вони територіально розташовані, та яке з них є унікальним за чистотою сировини для напівпровідникової якості?

7. Через які геохімічні особливості германію його власні мінерали не можуть задовольнити промисловий попит, і які техногенні джерела чи побічні продукти рудного виробництва виступають головною сировиною для його отримання?

Список рекомендованої літератури до розділу 5.

1. Periodic Table Of Elements. Джерело: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Of_Elements.svg

2. Boron Open Pit–Mojave Desert, California, USA. Джерело: https://www.agapito.com/portfolio-posts/boron-open-pit-mojave-desert-california-usa/

3. Resource Special: The Impact of Silicon. Джерело: https://www.nugreen.co.uk/resource-special-the-impact-of-silicon/

4. Electronics manufacturing. Джерело: https://ukraineinvest.gov.ua/en/industries/electronics/

5. Where Germanium Comes From. Джерело: https://sot.com.sg/get-germanium/

6. Arsenic: Will it take the shine off the red metal? Джерело:

https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/arsenic-will-it-take-the-shine-off-the-red-metal

7. Canada’s only primary antimony mine remains idle under Chinese ownership. Джерело: https://www.miningreporters.com/noticia/news/2026/03/chinese-owned-canada-antimony-mine-idle-beaver-brook

РОЗДІЛ 6. НЕМЕТАЛЕВА КРИТИЧНА МІНЕРАЛЬНА СИРОВИНА

У розділі наведена інформація щодо освоєння критичних матеріалів, що не відносяться до металів та металоїдів. При вивчення матеріалу здобувач повинен: чітко знати специфічні фізико-хімічні властивості природного графіту, флюориту, фосфоритів, коксівного вугілля та гелію; оцінювати глобальні та геополітичні ризики; засвоїти технологію переробки природного графіту, а також екологічні наслідки забруднення ґрунтів важкими металами; усвідомлювати незамінність фосфору та гелію у продовольчій безпеці, а також унікальність гелію як вичерпного стратегічного газу-холодоагенту; аналізувати ресурсний потенціал України, а також усвідомлювати критичну залежність держави від імпорту неметалевої КМС.

6.1. Основні відомості про неметалеву критичну сировину

Неметалева критична мінеральна сировина, до якої належать природний графіт, флюорит, фосфорити та інші матеріали, є незамінною основою для високотехнологічного виробництва та «зеленого» переходу. Унікальність цієї сировини полягає в особливих фізико-хімічних властивостях – надвисокій термостійкості, електропровідності або хімічній інертності, які неможливо відтворити за допомогою металів.

Дефіцит цих матеріалів зумовлений низькою концентрацією їхніх природних запасів, а також домінування Китаю на світовому ринку видобутку та переробки, що сягає 70–80%. Ситуація ускладнюється тривалим і капіталомістким процесом глибокого збагачення руди, через що пропозиція на ринку не встигає за стрімким зростанням попиту з боку виробників літій-іонних акумуляторів і напівпровідників.

Також неметалевою сировиною у списках CRM (Critical Raw Materials) є коксівне вугілля та гелій. Вони займають особливі позиції серед неметалевої сировини через критичну залежність від них базової промисловості. Коксівне вугілля є безальтернативним компонентом для виплавки сталі, а його дефіцит посилюється жорсткими екологічними обмеженнями на видобуток у Європі.

Гелій, своєю черговою, унікальний як стратегічний інертний газ із наднизькою температурою кипіння, без якого неможливе охолодження медичних томографів (МРТ) та реакторів для виробництва мікрочипів. Обидва ці матеріали критично важливі для України, яка має власні потужні запаси коксівного вугілля на Донбасі, але повністю імпортує гелій для високих технологій.

Для захисту власної економічної безпеки провідні держави світу, включаючи Україну, офіційно вносять ці неметалеві мінерали до стратегічних списків і активно шукають альтернативні ланцюжки постачання.

6.2. Неметали

6.2.1. Графіт

За даними Геологічної служби США, світове виробництво природного графіту в 2016 році становило 1 200 000 тонн, з яких основні експортери: Китай (0,78 млн т), Індія (0,17 млн т), Бразилія (0,08 млн т), Туреччина (0,03 млн т) і Північна Корея (6 000 т). Виробництво синтетичного графіту в США в 2025 році склало 174 000 тонн на суму 1,4 мільярда доларів США.

Графіт видобувають як відкритим (рис. 6.1), так і підземним способами. Графіт зазвичай потребує збагачення, що може виконуватися шляхом ручного збирання шматків пустої породи (скелі) та ручного просіювання продукту або шляхом подрібнення породи та виплавки графіту. Збагачення шляхом флотації стикається з труднощами, пов’язаними з тим, що графіт дуже м’який і покриває частинки пустої породи. Це змушує «мічені» частинки пустої породи спливати разом із графітом, утворюючи нечистий концентрат.

Існує два способи отримання комерційного концентрату або продукту – це багаторазове повторне подрібнення і флотація (до семи разів) для очищення концентрату або кислотне вилуговування пустої породи фтористоводневою кислотою або соляної кислоти (для карбонатної породи).

Під час помелу вхідні графітові продукти та концентрати можуть бути подрібнені перед класифікацією (за розміром або просіюванням), з більш грубими фракціями, а потім визначається вміст вуглецю. Деякі стандартні суміші

можна приготувати з різних фракцій, кожна з яких має певний розподіл пластівців за розміром і вмістом вуглецю. Якщо розмір пластівців неважливий, концентрат можна подрібнити більш вільно.

Типові кінцеві продукти включають дрібний порошок для використання в якості суспензії при бурінні нафтових свердловин і покриттів для ливарних форм. Вплив графітових заводів на навколишнє середовище включає забруднення повітря та ґрунту важкими металами.

У структурі Українського кристалічного щита виділяють чотири ключові графітоносні райони: Приазовський, Криворізький, Побузький та Бердичівський. Загалом тут зосереджено близько 100 родовищ і проявів кристалічного графіту. За своїм походженням усі вони належать до метаморфічного типу, а їхнє формування пов’язане з гірськими породами архейського та протерозойського віку (рис. 6.1).



Рис. 6.1. Розробка Заваллівського родовища графіту [1]

Глибина залягання графітових покладів коливається в межах від 10 до 80 метрів. Рудовмісні породи представлені пластовими та лінзоподібними структурами, потужність яких може досягати 300 метрів, а довжина становить від 500 до 1500 метрів (окремі тіла тягнуться на 3,5–5,0 км). Графіт має лускувату морфологію, а його середня концентрація в рудній масі варіюється від 2,5% до 20% (іноді сягає 30%).

На сьогодні державним балансом України обліковано приблизно 230 млн тонн графітової руди, при цьому потенціал для збільшення сировинної бази за рахунок прогнозних ресурсів оцінюється ще у 100 млн тонн.

6.2.2. Фосфор

Фосфор (фосфорити) є критичною сировиною через залежність від нього глобальної продовольчої безпеки на тлі високих геополітичних ризиків постачання. Він є фундаментом продовольчої безпеки, оскільки до 91% усього видобутого у світі фосфору використовується у сільському господарстві для виробництва мінеральних добрив. Фосфор разом з азотом і калієм є необхідними для росту рослин. На відміну від нафти чи деяких металів, фосфор неможливо замінити жодним іншим хімічним елементом у харчовому ланцюгу, а за його відсутності світове аграрне виробництво суттєво деградує.

Видобуток фосфоритних руд здійснюється в основному відкритим способом (рис. 6.2), рідше підземним. Залежно від характеру сировини і її призначення, фосфорити або розмелюють на борошно, або перетворюють їх у розчинні фосфати. Засобів комерційного виробництва фосфору, окрім видобутку, небагато, оскільки цикл фосфору не включає значне транспортування у газовій фазі.



Рис. 6.2. Розробка родовища фосфоритних руд [2]

Переважним джерелом фосфору в наш час є фосфорит. Виробництво фосфоритної сировини в США досягло піку в 1980 році і склало 54,4 мільйона метричних тонн. Сполучені Штати Америки були найбільшим у світі виробником фосфоритної сировини з 1900 року до 2006 року, коли виробництво Китаю перевищило виробництво США .

Більшість фосфоровмісного матеріалу використовується для сільськогосподарських добрив. Для цього фосфатну руду переважно переробляють "мокрим" (екстракційним) способом, що передбачає її обробку сірчаною кислотою з утворенням фосфорної кислоти. Фосфорна кислота потім нейтралізується з утворенням різних фосфатних солей, які входять до складу добрив. У мокрому процесі фосфор не зазнає окисно-відновної дії. На одну тонну виробництва фосфорної кислоти утворюється близько п’яти тонн відходів фосфогіпсу.

Для використання фосфору в ліках та миючих засобах застосовують термічний процес, де мінерали перетворюються на білий фосфор, який можна очистити дистиляцією.

Незважаючи на значні розвідані поклади фосфатної сировини в Україні, на сьогодні промисловий видобуток власного фосфору практично відсутній. Державним балансом запасів України обліковуються значні ресурси фосфатної сировини (понад 475 млн тонн руди, що еквівалентно близько 15 млн тонн чистого оксиду фосфору P_2O_5). Ця сировина представлена двома основними типами: магматичні апатитові руди та осадкові фосфорити (конкреційні та зернисті). Таким чином країна залишається критично залежною від імпорту фосфатів, що на тлі руйнування старих ланцюжків постачання та глобальних дефіцитів у 2025–2026 роках створює значні виклики для агросектору.

6.3. Гелій (благородний газ)

Гелій є критичним мінералом, оскільки він незамінний для охолодження магнітів у томографах (МРТ), виробництва напівпровідників і космічної галузі,

а замінити його іншим елементом неможливо. Головна проблема полягає в тому, що гелій це вичерпний ресурс, який у разі витоку безповоротно вилітає в космос. Гелій утримується під землею завдяки герметичним підземним «пасткам» та радіоактивному розпаду важких елементів, які постійно поповнюють його запаси протягом мільйонів років. При цьому його видобувають не з повітря, а виключно як супутній газ під час переробки природного газу, де його концентрація достатня для промислового вилучення.

Основними світовими виробниками та постачальниками гелію є США (рис. 6.3), Катар та Алжир. В Україні промислового видобутку гелію наразі немає, хоча його перспективні запаси виявлені в природних газах Дніпровсько-Донецької западини. Гелій видобувається з газу процесом низькотемпературного поділу, який передбачає фракційну дистиляцію або мембранне розділення газів.



Рис. 6.3. Підприємство з видобутку гелію в США [3]

У промисловості гелій отримують з природних газів, що містять гелій (в даний час експлуатуються головним чином родовища, що містять більше 0,1% гелію). Об’єкти розташовані неподалік від Г’юґотон (США) та інших родовищ

природного газу на південному заході Канзасу та околиці Оклахоми, а також родовища Панхендл у Техасі. Ці родовища містять природний газ із надзвичайно високим вмістом гелію – від 0,3% до 2,7%. Вони є найбільшими джерелами гелію в Сполучених Штатах.

Гелій отримують як супутній компонент під час видобутку природного газу. Його виділяють серед інших газових домішок способом низькотемпературної сепарації, оскільки цей елемент має найнижчу температуру зрідження. Процес охолодження відбувається поетапно за допомогою дроселювання, що дозволяє паралельно видаляти вуглеводні та вуглекислий газ.

Отримана в такий спосіб фракція складається з гелію, неону й водню. Цей концентрат, відомий як сирий гелій (вміст цільового газу становить 70–90%), спочатку позбавляють від водневих домішок (4–5%) шляхом пропускання через оксид міді(II) за температури 650–800 К. Фінальну стадію рафінування здійснюють через охолодження залишку рідким азотом, що кипить під зниженим тиском, а також за допомогою поглинання залишків домішок активованим вугіллям у спеціальних криогенних адсорберах. На виході постачається продукт технічного (99,80%) або високого (99,985%) ступеня чистоти.

В Україні основні поклади гелію зосереджені в газових родовищах Харківського регіону та прилеглих областей. Фахівці Українського НДІ природного газу (м. Харків) встановили, що під час гирлових пробовідборів на 25 свердловинах Харківщини об’ємна частка [He] коливалася від 0,028% до 1,020%. При цьому некондиційний вміст газу виявили лише у трьох свердловинах із двадцяти п’яти.

Початковий потенціал надр Харківської області тільки на 18 об’єктах оцінювався майже у 430 млн м³ (балансові запаси), тоді як позабалансові ресурси ще трьох родовищ становили близько 151 млн м³. За роки розробки прямі втрати гелію сягнули орієнтовно 489 млн м³, і наразі на державному балансі в регіоні залишається приблизно 92 млн м³ цього благородного газу.

У сусідній Полтавській області УкрНДІгаз оцінив початкові запаси на 22 родовищах у 149,6 млн м³. Втрати газу під час видобутку там перевищили 50 млн

м³, а поточні балансові запаси становлять 96,9 млн м³. З огляду на концентрацію гелію, деякі українські родовища не поступаються газогелієвим об'єктам США і мають високу промислову цінність для його екстракції.

6.4. Критична сировина в мінералах

6.4.1. Польовий шпат

Польовий шпат є найпоширенішим мінералом, що становить понад 50-60% земної кори. Однак його визнано критичною сировиною через колосальний дефіцит високоякісної (лужної) сировини для високотехнологічних галузей та високою імпортозалежністю провідних промислових країн. Попри те, що звичайного граніту на планеті багато, родовищ чистого і якісного польового шпату з низьким вмістом заліза (яке забарвлює скло і псує його оптичні властивості) у світі порівняно мало.

Головні причини критичного статусу польового шпату це його важливість у «зеленій» енергетиці, оскільки високоочищений польовий шпат є незамінним компонентом для виробництва спеціального надміцного скла для сонячних панелей та захисного скла високої прозорості для електроніки. Без нього неможливо нарощувати потужності відновлюваної енергетики.

Магматичні польовошпатові породи непегматитового походження класифікують на дві основні категорії. Першу з них формують алюмосилікатні породи, головними складниками яких є кварц та польові шпати. Типовими представниками цієї групи є аляскіти, граніти, апліти, фельзити тощо.

Розробка родовищ відбувається відкритим способом. Використовується ручна праця і спеціальна техніка в кар'єрах і на гірничих виробках. Відповідно до різних типів польових шпатів та властивостей руд, його обробка включає магнітну сепарацію, флотацію, гравітаційну сепарацію та комбіновану технологію, для видалення мінеральних домішок слюди і отримання концентрату польового шпату високої якості.

Збагачення польового шпату передбачає видалення небажаних мінеральних домішок і підвищення якості сировини відповідно її подальшого промислового використання.

Технології збагачення включають дроблення, просіювання частинок, концентрацію (що передбачає відділення цінних мінералів від іншої сировини, отриманої з млина) і промивання для концентрації бажаних компонентів. В подальшому застосовують промивання, очищення, класифікацію, флотацію (розділення кварцу та польового шпату). Іноді для подальшого видалення заліза потрібна магнітна сепарація.

Для України забезпечення польовим шпатом є критично важливим. Попри наявність великих покладів на Житомирщині та Вінниччині, тривалий час більша частина якісного шпату завозилася з-за кордону (зокрема з Туреччини). Сьогодні в Україні активно розробляються технології збагачення місцевих комплексних руд, щоб перекрити внутрішній дефіцит для вітчизняних скляних та керамічних заводів і вийти на ринок ЄС.

Родовище польових шпатів «Гірне» (рис. 6.4) знаходиться у Романівському районі Житомирської області, а його сировинна база сягає до 1,5 млн т.



Рис. 6.4. Відкрита розробка польового шпату на родовищі «Гірне» [4]

На кар'єрі видобуваються польовошпатові руди, придатні для виробництва кварц-польовошпатової сировини та граніту для виробництва бутового каменю.

Балансові запаси польового шпату також є у родовищі «Балка Великого Табору» (Запорізька область). Польовий шпат також міститься у гранітних масивах Кіровоградської області. Основними споживачами польовошпатової та кварц-польовошпатової сировини в Україні є виробники скла: ПРАТ «ВЕТРОПАК Гостомельський склозавод» (м. Гостомель), ТОВ «Вільногірське скло» (м. Вільногірськ). Виробництво санітарно-технічної кераміки, керамічної плитки й керамограніту: «Інтеркерама» (м. Дніпро), ЗАО «Зевс-Кераміка» та ЗАО «Керамічні маси Донбасу» (м. Слов'янськ), «Cersanit» (Житомирська обл.), ТОВ «Дніпрокераміка» (м. Пологи), ОАО «Будфарфор» (м. Славута), ПАО «Харківський плиточний завод» (м. Харків) [5].

6.4.2. Флюорит (плавиковий шпат)

Унікальність флюориту полягає в тому, що він є єдиним мінералом на Землі, що містить фтор у промислових масштабах, а також має виняткові фізико-оптичні властивості. Флюорит є критичною сировиною, оскільки він незамінний у металургії як флюс для розрідження шлаків. Також він використовується у хімічній промисловості для виробництва фтористоводневої кислоти, необхідної для виплавки алюмінію. Флюорит є незамінним при збагаченні урану та виготовленні літій-іонних акумуляторів.

Флюорит відіграє критично важливу роль у виробництві сучасних мікропроцесорів та наночипів з двох ключових причин: у фотолітографії (як лазерна оптика) та у хімічному травленні кремнію (як сировина для плавикової кислоти). Замінити флюорит високої якості у цих галузях практично неможливо, що робить світову промисловість цілком залежною від його постачання. Основні світові запаси та видобуток цього мінералу зосереджені в Китаї, Мексиці, Монголії, Південній Африці та В'єтнамі.

Видобуток і збагачення флюориту це складний багатокроковий

промисловий процес. Його мета перетворити руду, яка містить усього 15–30% корисного мінералу, на надчистий концентрат кальцію [CaF_2].

Процес отримання кінцевого продукту поділяється на кілька ключових етапів, а саме видобуток флюоритові руди відкритим (рис. 6.5) або підземним способом. При цьому застосовується буропідривна підготовка скельної маси, яку потім екскавують і самоскидами вивозять на збагачувальні фабрики. Підземний спосіб використовується, коли рудні жили залягають глибоко під землею. Це дорожчий метод, але він дозволяє видобувати цінні кристали з мінімальним пошкодженням навколишнього середовища.



Рис. 6.5. Розробка флюориту в США [6]

Після видобутку руди вона потрапляє на щокові та конусні дробарки для подрібнення до фракції 5–20 мм. Потім на кульових або стержневих млинах руда змішується з водою і перетирається до стану рідкого тонкодисперсного порошку (пульпи). Це необхідно, щоб фізично звільнити дрібні зерна флюориту від домішків (кварцу, кальциту, бариту).

Збагачення флюориту відбувається з метою відділення його від пустої породи. Пульпу подають у флотаційні машини, куди вводять хімічні реагенти-

збирачі та рідке скло. Реагенти роблять поверхню флюориту гідрофобною. Крізь суміш пропускають бульбашки повітря. Частинки флюориту чіпляються до бульбашок, піднімаються на поверхню і створюють стійку мінеральну піну, яку згрібають спеціальні лопаті. Непотрібний бруд (кварц та глина) осідає на дні.

Оскільки флюорит важчий за кварц, мінерали розділяють у потоках води за допомогою відсаджувальних машин або гвинтових сепараторів. Для отримання вищих сортів піну згущують, фільтрують від води на пресах і висушують в обертових сушильних печах до стану сухого концентрату. Проте, щоб отримати кислотний флюорит найвищого ґатунку >97%, який потрібен для виробництва процесорів, урану та акумуляторів, часто застосовують хімічне вилуговування кислотами.

В Україні промислові поклади флюориту виявлені на Хмельниччині (Бахтинське родовище) та в Приазов'ї, проте наразі країна повністю залежить від його імпорту.

6.5. Критична мінеральна сировина в породах і корисних копалинах

6.5.1. Фосфатна порода

Фосфатна порода (фосфорити та апатити) – це природне мінеральне утворення, яке містить високу концентрацію сполук фосфору. Вона є першоджерелом для всієї світової фосфорної індустрії.

Провідні уряди світу офіційно внесли фосфатну породу до списків критичних мінералів через кілька фундаментальних факторів. По-перше, він має абсолютну незамінність в агросекторі, оскільки понад 95% усієї видобутої породи йде на виробництво фосфорних добрив.

До цього додається критичність фосфатної сировини магматичного походження, оскільки вона застосовується у виробництві очищеної фосфорної кислоти, необхідної у технології виготовлення літій-залізо-фосфатних акумуляторів. Це найпопулярніший тип батарей для електромобілів (Tesla чи BYD) та систем збереження енергії.

Видобуток і збагачення фосфатної породи це складний індустріальний процес, який дозволяє перетворити бідну руду на концентрат із високим вмістом п’ятиоксиду фосфору [P_2O_5]. Саме він придатний для виробництва добрив та акумуляторів.

Процес складається з таких основних етапів, як видобуток фосфатної породи відкритим способом, що сягає понад 90% від загального об’єму (рис. 6.6). Осадкові фосфорити (як у Марокко, США, Єгипті) зазвичай залягають відносно близько до поверхні. Спочатку крокуючі екскаватори (драглайни) знімають верхній шар розкривних порід, а потім видобувають фосфатний шар корисної копалини.



Рис. 6.6. Розробка фосфатної породи в Китаї [7]

У деяких випадках використовується підземний спосіб для розробки глибоких магматичних апатитових руд. Руду підривають під землею та піднімають на поверхню через шахтні стовбури.

При підготовці руди до переробки застосовують подрібнення та дезінтеграцію. Руда змішується з водою у спеціальних агрегатах або млинах, великі шматки роздроблюються, а глинисті домішки розмиваються. Отриману рідку пульпу просіюють крізь серію сит, щоб відокремити великі чисті шматки

фосфату від дрібного сміття. Збагачення фосфатної руди здійснюється для видалення домішків у вигляді кварцового піску, глини, кальциту та заліза, і підвищення вмісту фосфатного компонента в концентраті. Для цього використовують промивку та грохочення (для багатих руд).

Фосфатні мінерали часто міцніші за глину, тому руду просто інтенсивно промивають потужними струменями води. Глина вимивається, а чисті зерна фосфату залишаються. При пінній флотації пульпу подають у флотаційні чани та додають спеціальні хімічні реагенти (жирні кислоти, паливну оливу). Ці речовини покривають лише часточки фосфату, роблячи їх «жирними» та водовідштовхувальними.

Фінішна обробка може включати кальцинацію. Отриманий фосфатний концентрат зневоднюють на центрифугах або фільтрах та висушують. Якщо в руді залишається багато органічних домішок чи карбонатів, концентрат відправляють на кальцинацію випалювання в обертових печах за температури 800–1000°C. Після цього отримують готовий товарний фосфатний концентрат із вмістом P_2O_5 понад 30–34%, який доставляється споживачу.

У забезпеченні світових ринків фосфатною сировиною існують високі геополітичні ризики, оскільки видобуток сконцентрований всього у кількох країнах. Ринок цієї сировини суттєво залежить від політичних рішень. Наприклад, Китай регулярно обмежує експорт фосфатів для захисту внутрішнього ринку, а логістичні кризи у Червоному морі чи Суецькому каналі моментально паралізують постачання сировини до Європи.

Родовища фосфатної породи в Україні поділяються на дві основні групи, але наразі жодне з них промислово не розробляється. Найперспективнішими є магматичні апатит-титанові родовища Житомирщини - Стремигородське, Федорівське та Кропивнянське, де фосфор можна видобувати комплексно як супутній елемент до стратегічного титану.

Осадкові фосфорити зосереджені переважно на Поліссі та Поділлі, де ключовими є Вижевська ділянка на Волині та історичне Жванське родовище на Вінниччині. Додаткові поклади зернистих фосфоритів також розвідані на

Сумщині (Новоселівське родовище) та на сході країни (Осинівське родовище). Освоєння цих об'єктів стримується потребою у великих інвестиціях для будівництва збагачувальних фабрик та складними безпековими ризиками.

6.5.2. Коксівне вугілля

Коксівне вугілля є критичною сировиною для ЄС, оскільки воно залишається абсолютно незамінним компонентом у традиційному доменному виробництві сталі, де діє як паливо та відновник залізної руди. Сталеливарна промисловість Євросоюзу критично залежить від стабільного постачання цієї сировини, адже без неї зупиняться машинобудування, будівництво та оборонний комплекс.

Головна проблема для ЄС полягає у високій імпортозалежності, оскільки власні обсяги видобутку постійно скорочуються через закриття шахт із екологічних міркувань. Повна відмова від коксівного вугілля та перехід на «зелену» сталь за допомогою водню потребують тривалого часу та колосальних інвестицій, що робить цей ресурс стратегічним на найближчі десятиліття. Найбільшими постачальниками коксівного вугілля до ЄС є Австралія, США та Канада, а всередині самого Євросоюзу його видобуток підтримує переважно лише Польща.

Метод видобутку вугілля безпосередньо визначається глибиною розташування його пластів. За умови, що поклади залягають не глибше ста метрів, їх розробку здійснюють на вугільних розрізах. Доволі часто в міру заглиблення кар'єру подальші роботи стають вигіднішими у разі зміни технології – переходу від відкритих робіт до підземних. Якщо ж копалини розташовані на значній глибині, яка може перевищувати 1000 метрів, для їх вилучення будують шахти. Проте підземний спосіб супроводжується втратами сировини, які часом досягають 40%. Важливо зазначити, що у вугленосних товщах також зосереджені й інші мінерали, що мають промислове значення, зокрема шахтний метан, рідкісні та розсіяні елементи, а також германій.



Рис. 6.7. Видобуток коксівного вугілля на розрізі [8]

Для розробки вугілля з великих глибин найбільш ефективним є використання шахт. Однак при цьому втрата сировини може сягати до 40%. На шахтах вугілля може видобуватися з глибини понад 1000 м. У вугленосних відкладах поряд з вугіллям містяться багато видів георесурсів, що мають споживчу значимість (метан вугільних пластів, рідкісні та розсіяні елементи, германій).

При отриманні коксівного вугілля воно випалюється в безповітряній (коксовій) печі , при температурах зазвичай близьких до 1000–1100 °C (1800–2000 °F). В окремих випадках температура випалювання може сягати 2000°C (3600°F). Цей процес випаровує або розкладає органічні речовини у вугіллі, відганяючи воду та інші леткі та рідкі продукти, такі як вугільний газ і кам'яновугільна смола.

Кокс це нелеткий залишок розкладання, цементований разом з вуглецем і мінеральним залишком вихідних частинок вугілля у формі твердої та дещо склоподібної твердої речовини. Додатковими побічними продуктами коксування є кам'яновугільний пек, аміак (NH_3), сірководень (H_2S), піридин, ціанід водню та матеріал на основі вуглецю.

Оцінені ресурси вугілля в Україні до глибини 1500 м складають 117,2 млрд т, з яких 45,8 млрд т розвідані балансові запаси, в числі яких 32,1 млрд т – енергетичне вугілля і 13,7 млрд т – коксівне.

Запаси кам’яного вугілля категорій А+В+С1 в Україні на кінець ХХ століття за українськими джерелами складали близько 43,1 млрд т, категорії С2 – 10,1 млрд т. Запаси в Донецькому і Львівсько-Волинському басейнах (94,9 % від загальних запасів вугілля України: 92,4 % – в Донецькому і 2,5 % – у Львівсько-Волинському). Понад третина запасів цих басейнів – коксівне вугілля. При річному видобутку 100 млн. т цих запасів вистачає на 570 років.

Контрольні запитання:

1. Які особливі фізико-хімічні властивості неметалевої критичної сировини роблять її незамінною для високотехнологічного виробництва, та які країни наразі домінують на світовому ринку її видобутку й переробки?
2. У чому полягає стратегічна важливість коксівного вугілля для базової промисловості та високих технологій, і яка ситуація з їх наявністю в надрах України?
3. Через які унікальні властивості природного графіту його флотаційне збагачення стикається з труднощами, і які два основні способи застосовують для отримання чистого комерційного концентрату?
4. У межах якої великої геологічної структури в Україні розташовані основні графітоносні райони та родовища, і якими є обсяги облікованих запаси цієї сировини?
5. Чому фосфор (фосфорити) визнано фундаментом глобальної продовольчої безпеки, і які наслідки для світового агросектору має відсутність його замінників у харчовому ланцюгу?
6. Яка принципова різниця між "мокрим" та термічним процесами переробки фосфатної руди, і яка екологічна проблема пов’язана з утворенням відходів фосфогіпсу?
7. Чому гелій вважається вичерпним і дефіцитним ресурсом, з якої саме природної сировини його видобувають і в якій геологічній структурі України виявлено його перспективні запаси?

Список рекомендованої літератури до розділу 6.

1. Графітовий кар'єр, Завалля. Джерело: https://ua.igotoworld.com/ua/poi_object/99968_grafitovyy-karer.htm

2. Ammaroo Phosphate Project. Джерело: https://www.nsenergybusiness.com/projects/ammaroo-phosphate-project/

3. Rarefied Air: Drilling for Helium in North America. Джерело: https://jpt.spe.org/rarefied-air-drilling-for-helium-in-north-america

4. Дочірнє підприємство «Шпат». Джерело: http://www.shpat.com.ua/index.php

5. Польові шпати. Джерело: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%BE%D0%B2%D1%96_%D1%88%D0%BF%D0%B0%D1%82%D0%B8

6. Fluorspar mine restart makes Newfoundland the only North American producer of critical mineral. Barb Dean-Simmons/SaltWire/Postmedia files. Джерело: https://ca.finance.yahoo.com/news/fluorspar-mine-restart-makes-newfoundland-161602342.html

7. Phosphate rock. Джерело: https://www.guizhoulinhua.com/en/phosphate-rock

8. Major coal miners in China vow to boost output and cap prices. Джерело: https://www.cnbc.com/2021/10/20/major-coal-miners-in-china-vow-to-boost-output-and-cap-prices.html

РОЗДІЛ 7. ВОДА ЯК СТРАТЕГІЧНИЙ РЕСУРС ПРИ ОСВОЄННІ КРИТИЧНИХ МІНЕРАЛІВ

У розділі розглянуто значення водних ресурсів при видобутку та переробці критичної мінеральної сировини й охарактеризовано основні напрями використання води у виробничих процесах. Висвітлено проблеми водного стресу, водної кризи та виснаження водних ресурсів, показано значення поверхневих і підземних вод для водозабезпечення гірничих проєктів та необхідність врахування водного фактору протягом усього життєвого циклу освоєння родовищ.

7.1. Загальні відомості про використання води при освоєнні КМС

Критична мінеральна сировина є важливою складовою сучасної економіки та технологічного розвитку Європейського Союзу та світу, відповідно літій, кобальт, нікель, мідь, графіт, рідкісноземельні елементи та інші види цієї сировини використовуються у багатьох видах виробництв – а саме акумуляторних батарей, електромобілів, вітрових турбін, електронного обладнання, а також у цифрових, оборонних та аерокосмічних технологіях, що було описано нами детально у попередніх розділах. У зв’язку з енергетичним переходом і розвитком низьковуглецевих технологій надійність постачання такої сировини набула для ЄС стратегічного значення [1, 2].

При цьому забезпечення критичною мінеральною сировиною залежить не тільки від наявності та типу родовищ, обсягів запасів і технологій видобутку, а й від наявності та кількості води, без якої неможливі якісні видобуток і переробка більшості видів мінеральної сировини. Вода необхідна для збагачення руд, флотації, гідрометалургійних процесів, промивання, охолодження, пилопригнічення, транспортування пульпи та інших видів технологічних операцій. Одночасно розробка родовищ пов’язана з необхідністю управління шахтними й кар’єрними водами, дренажем гірничих виробок, поверхневим стоком та водами, які контактують із відходами видобування і переробки.

Таким чином, доступ до критичної мінеральної сировини безпосередньо пов’язаний із доступом до достатніх за кількістю та якістю водних ресурсів, що

особливо важливо в умовах зміни клімату, зростання частоти посух і загострення конкуренції за воду між промисловістю, населенням, сільським господарством та природними екосистемами. Для окремих видів критичної сировини водний фактор вже сьогодні є одним із суттєвих ризиків стабільності постачання [3]. Особливо показовими є літій і мідь, понад 50 % сучасного виробництва яких, за оцінками Міжнародного енергетичного агентства, зосереджено в районах із високим рівнем водного стресу, наприклад, окремі гірничодобувні райони Чилі та Австралії (рис. 7.1). Взагалі просторовий розподіл водних ресурсів характеризується значною неоднорідністю у світі, і для їх комплексної оцінки разом із показниками водного стресу використовують поняття сукупного водного ризику, яке враховує не лише фізичну доступність і якість води, але й регуляторні та репутаційні чинники. Як видно з (рис. 7.1), території з високим і надзвичайно високим рівнем сукупного водного ризику охоплюють значні частини Північної Африки, Близького Сходу, Центральної та Південної Азії, а також окремі райони Північної Америки, Південної Африки та Австралії.

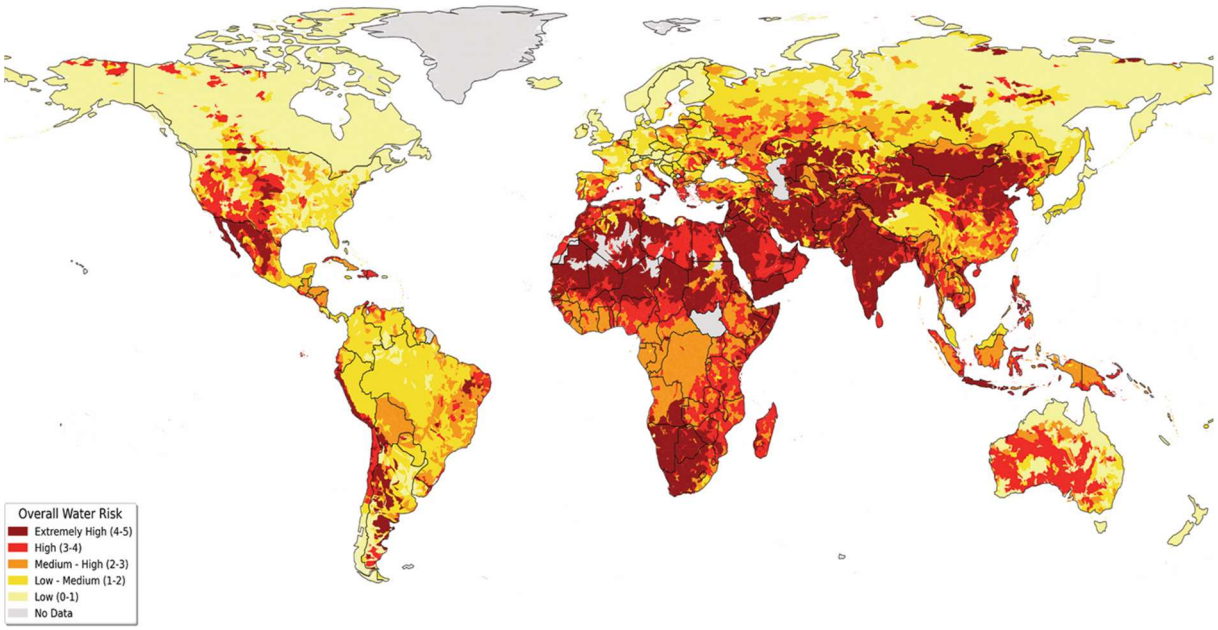


Рисунок 7.1 – Сукупний водний ризик у різних регіонах світу (за даними WRI Aqueduct 4.0)

Вищі значення водного ризику відповідають вищому рівню ризику, пов'язаного з водними ресурсами і у таких умовах водозабезпечення гірничих підприємств, конкуренція за доступні водні ресурси та запобігання погіршенню стану поверхневих і підземних вод є важливими складовими оцінювання сталості сировинних проєктів. Також це безпосередньо впливає на стабільність роботи гірничих підприємств і, відповідно, на надійність ланцюгів постачання мінеральної сировини [3, 6].

Масштаб сучасних проблем із водними ресурсами сьогодні характеризується вже не лише поняттями «водний дефіцит» або «водний стрес», у 2026 р. Інститут води, довкілля та здоров'я Університету ООН запропонував поняття «глобальне водне банкрутство» [3, 6]. «Глобальне водне банкрутство» (рис. 7.2) характеризує стан, при якому тривале використання води та її забруднення перевищують обсяги природного відновлення водних ресурсів і безпечні межі їх виснаження, а окремі елементи водної системи вже не можуть повернутись до попереднього стану. Тобто йдеться про ситуацію, коли людство використовує не лише відновлюваний «водний дохід», але й поступово витрачає природний «водний капітал» - запаси підземних вод, воду льодовиків, озер, водно-болотних угідь та інших природних ресурсів [6].

Різні регіони світу демонструють, що дефіцит води може бути наслідком принципово різних процесів, від тимчасового перевищення попиту над доступними ресурсами до тривалого виснаження поверхневих та підземних вод і незворотної трансформації водних екосистем. Саме тому поняття водного стресу, водної кризи та водного банкрутства не обов'язково послідовні та не є взаємозамінними. Як видно з рис. 7.2, водне банкрутство характеризує ситуацію, коли тривале перевищення можливостей водної системи супроводжується виснаженням або незворотною втратою частини природного водного капіталу [6, 7]. Одним із показових прикладів тривалого дисбалансу між доступними водними ресурсами та потребами водокористувачів є басейн річки Колорадо у США та Мексиці, адже високий рівень водокористування тут поєднується з тривалим посушливим періодом та зменшенням річкового стоку.

	Водний стрес	Водна криза	Водне банкрутство
Коротка характеристика	Високий попит за обмеженої доступності водних ресурсів	Гостра, обмежена в часі ситуація	Стійкий посткризовий стан
			
Стан водних ресурсів	Нормальний або знижений рівень	Критично низький рівень	Виснаження водних ресурсів
Визначення	Стан, за якого споживання води є високим відносно її доступних ресурсів, але навантаження на екосистеми ще залишається в допустимих межах	Гостре порушення функціонування водної системи, спричинене надзвичайними чинниками, яке тимчасово перевищує її спроможність, але не призводить (або майже не призводить) до незворотних змін	Стан, за якого тривале надмірне використання водних ресурсів призводить до виснаження водоносних горизонтів, річкових систем та екосистем і виникнення незворотних змін
Зворотність стану	**Переважно зворотний** за умови ефективного управління та впровадження відповідних заходів	**Потенційно зворотний** після усунення надзвичайного чинника за умови своєчасних дій	**Частково або повністю незворотний** через втрату природного капіталу та структурні зміни у водних системах
Основні заходи управління	- Підвищення ефективності водокористування - Раціональне планування та розподіл ресурсів - Економічні та регуляторні інструменти - Проведення інституційних реформ	- Надзвичайні заходи реагування - Короткострокові обмеження водоспоживання - Кризові комунікації - Планове відновлення функціонування системи	- Скорочення попиту на воду - Перерозподіл водних ресурсів - Адаптація до нових умов - Відновлення екосистем (де можливо) - Довгострокові трансформаційні реформи
Приклади ситуацій	Басейни з високим рівнем водозабору без критичного виснаження ресурсів	Сильна посуха, масштабне забруднення, аварія на водогосподарській інфраструктурі	Тривале виснаження підземних вод (наприклад, в окремих регіонах Північної Індії або Близького Сходу), деградація річкових систем

Рисунок 7.2 – Три стани водогосподарських систем, що характеризують різний ступінь порушення їх функціонування

За даними [8] у 2000–2025 рр. середній стік Колорадо становив близько 15,2 км³ на рік, а відбір води впродовж значної частини цього періоду перевищував її надходження, що спричинило істотне скорочення запасів у водосховищах Мід і Пауелл та перегляд принципів розподілу водних ресурсів між штатами і водокористувачами.

Наочним прикладом виснаження підземних вод є Північна Індія, бо саме підземні води там надзвичайно важливі для зрошення та продовольчої безпеки, але неконтрольований водовідбір поєднується із зменшенням живлення водоносних горизонтів. За результатами аналізу супутникових даних

GRACE/GRACE-FO та гідрологічного моделювання встановлено, що протягом останніх 25 років запаси підземних вод Північної Індії зменшувалися приблизно на 1,5 см на рік, а їх сукупна втрата за цей період становила близько 450 км³ [9]. Дослідження показують, що зменшення літніх мусонних опадів скорочує природне поповнення запасів, одночасно підвищення температури та потреби у зрошенні збільшують експлуатаційний водовідбір. Цей приклад добре ілюструє відмінність між тимчасовим дефіцитом води та поступовим виснаженням водних ресурсів. Якщо відбір підземних вод протягом тривалого періоду перевищує їх природне поповнення, водогосподарська система фактично починає використовувати не лише відновлюваний ресурс, а й накопичені запаси води. Саме такий механізм є одним із ключових при формуванні стану, який у сучасних дослідженнях визначається як водне банкрутство [6,7].

Ще більш наочним прикладом довготривалої трансформації водної системи є Аральське море, де масштабне відведення вод Амудар'ї та Сирдар'ї на потреби зрошення призвело до різкого скорочення притоку води до моря та його поступового висихання (рис. 7.3). На місці значної частини колишнього морського дна сформувалася пустеля Аралкум площею близько 60 тис. км², а засолене дно стало осередком піщано-сольових і пилових бур, зміни водного режиму супроводжувалися деградацією екосистем, ґрунтів та умов господарської діяльності прилеглих територій [10].

Цей приклад важливий для розуміння поняття водного банкрутства, оскільки показує ситуацію, коли тривале антропогенне порушення водного балансу спричинило структурну трансформацію всієї природної системи. Навіть істотне скорочення водоспоживання та інші дії, спрямовані на відновлення водного об'єкту не буде гарантувати відновлення моря, навколишніх екосистем і ландшафтів до їх попереднього стану. Саме наявність таких довготривалих та незворотних змін відрізняє водне банкрутство від звичайної водної кризи [6,7]. Ці процеси свідчать також, що доступність води зараз визначається вже не лише поточним співвідношенням водозабору і ресурсів, але й накопиченим виснаженням природних систем їх формування та зберігання.

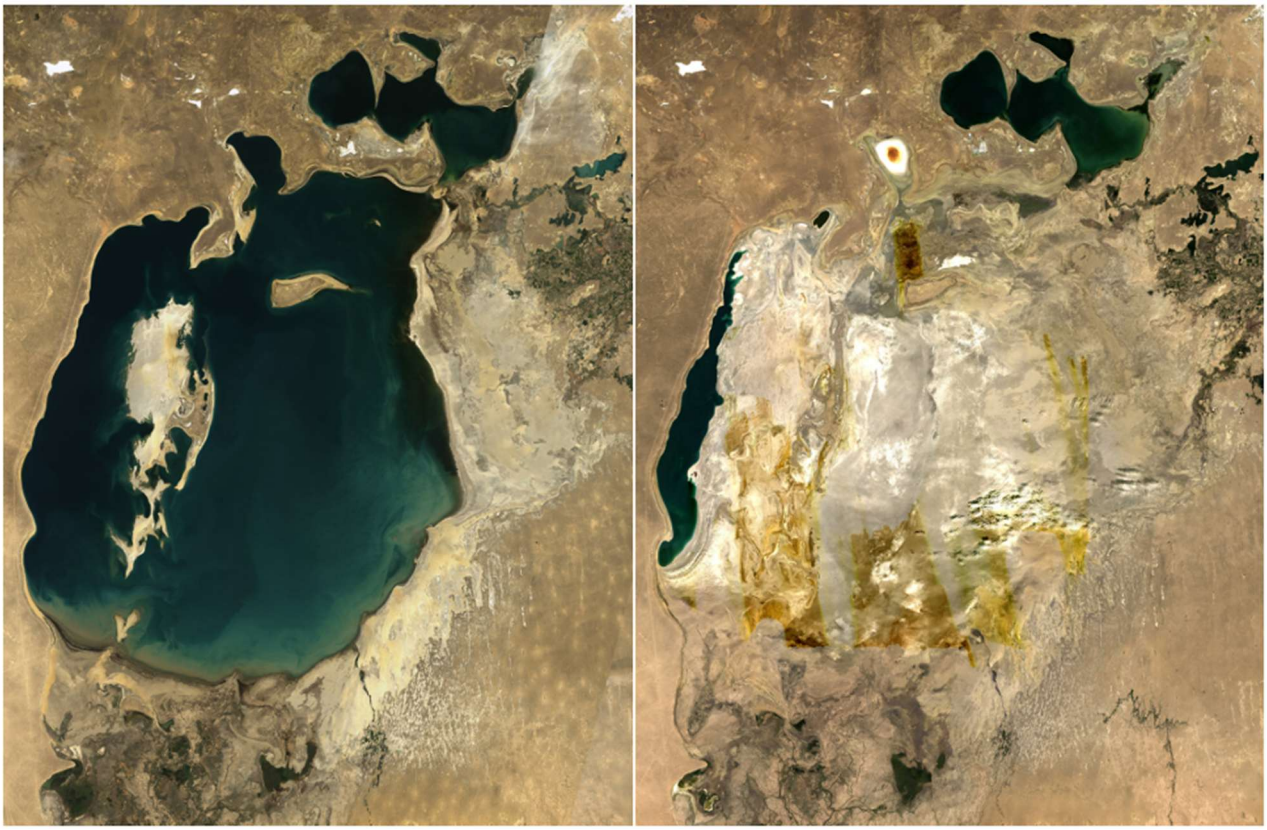


Рисунок 7.3 – Скорочення площі Аральського моря у 1989–2025 рр. внаслідок тривалого зменшення річкового притоку через інтенсивний водозабір у басейнах Амудар'ї та Сирдар'ї за даними супутникових знімків Landsat [6] (ліворуч – стан Аральського моря у 1989 р., праворуч – у 2025 р.).

Особливе значення в цьому контексті мають підземні води, які забезпечують можливість водопостачання в посушливі періоди та на територіях із недостатньою кількістю та якістю поверхневих водних об'єктів. Їх надмірна експлуатація має довготривалі наслідки: зниження рівнів підземних вод, скорочення їх розвантаження у річки та водно-болотні угіддя, погіршення якості води, виснаження у перспективі, а в окремих випадках і активізація негативних інженерно-геологічних процесів, наприклад просідання земної поверхні тощо. Тому відновлення запасів підземних вод не завжди є зворотним процесом навіть після скорочення водозабору [6].

Глобальні тенденції виснаження водних ресурсів стосуються і розвитку сектору критичної мінеральної сировини, адже нові гірничодобувні та переробні підприємства конкуруватимуть за водні ресурси з населенням, сільським

господарством, іншими галузями промисловості та природними екосистемами в цілому. Якщо родовище розташоване в басейні, де водні ресурси вже використовуються на рівні або вище меж їх природного відновлення, додатковий водозабір для потреб видобутку сировини може посилювати вже існуючий водний дефіцит. Водночас забруднення поверхневих та підземних вод фактично скорочує обсяг ресурсів, придатних для подальшого використання, отже в умовах глобального водного банкрутства наявність запасів критичних мінералів ще не означає можливості їх сталого освоєння через водозабезпеченість території та здатність її водних систем витримувати додаткове техногенне навантаження.

Водний фактор при цьому має подвійне значення, бо з одного боку, дефіцит води може обмежувати видобуток і переробку мінеральної сировини, а з іншого боку сама гірничодобувна діяльність суттєво змінює стан водних ресурсів. Водовідлив із шахт і кар'єрів може спричиняти зниження рівнів підземних вод, зміну їх якості, перерозподіл напрямків підземного стоку. Відвали, хвостосховища й технологічні майданчики виступають джерелами надходження забруднювальних речовин до поверхневих і підземних вод. Зміна рельєфу та умов стоку впливає на водний баланс території, а аварії на об'єктах з відходами створюють ризики швидкого погіршення стану водних об'єктів.

Для гірничого підприємства вода одночасно є ресурсом, який необхідно отримати та захистити, середовищем, яким необхідно управляти, і ризиком, здатним обмежувати процес видобутку – на основі цього управління водними ресурсами відноситься до пріоритетних складових формування сталих і відповідальних ланцюгів постачання критичних мінералів [4].

Масштаб проблеми нестачі водних ресурсів зростає разом зі збільшенням попиту на критичну мінеральну сировину – за прогнозами IEA, у сценарії чинної державної політики світовий попит на критичні мінерали майже подвоїться до 2040 р [2]. Найшвидше зростатиме попит на літій – більш ніж утричі, також потреба в нікелі, графіті та рідкісноземельних елементах може збільшитися приблизно на 50-90% [2]. Порівняння показників використання води для окремих

видів мінеральної сировини демонструє значну різницю у водоємності їх виробництва (рис. 7.4), наприклад серед наведених мінеральних ресурсів вищими показниками використання води характеризуються літій та рідкісноземельні елементи, тоді як для заліза та бокситів вони є значно нижчими. Отже, прогнозоване зростання попиту саме на низку водоємних видів критичної сировини може посилювати навантаження на водні ресурси, особливо в регіонах, які вже характеризуються високим рівнем водного стресу.

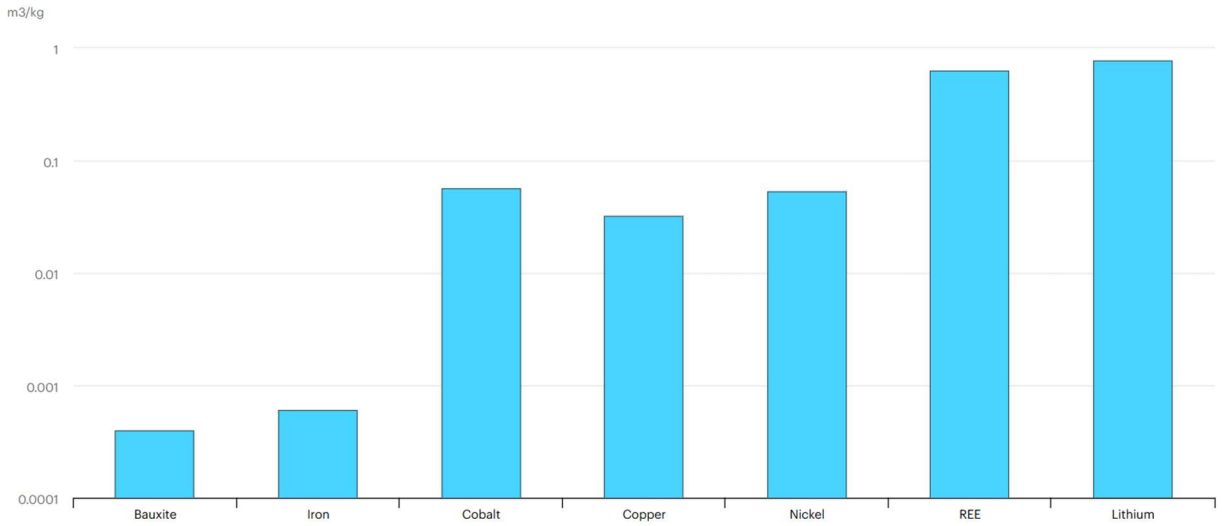


Рисунок 7.4 – Показники використання води для окремих видів мінеральної сировини (за даними IEA (2021)) [3]

Для Європейського Союзу питання забезпечення критичною сировиною має особливе значення у зв'язку із прагненням зменшити залежність від імпорту. Регламент (ЄС) 2024/1252 (CRMA) [1] встановлює рамки для формування безпечного, стійкого та диверсифікованого постачання критичної сировини, визначаючи 34 види критичної та 17 видів стратегічної сировини та встановлюючи орієнтири розвитку власного сировинного потенціалу ЄС. До 2030 р. передбачається наблизити видобувні потужності ЄС до рівня щонайменше 10% річного споживання стратегічної сировини, переробні потужності до 40%, а потужності з рециклінгу до 25%. Це означає, що збільшення власного видобутку відбуватиметься на територіях, де водні ресурси вже використовуються населенням, промисловістю, сільським господарством та

забезпечують функціонування екосистем. Тому стоїть гостре питання щодо забезпечення водними ресурсами освоєння нових родовища без неприйнятного впливу на їх кількісний і якісний стан.

Показово, що зв'язок між сировинною та водною політикою останнім часом безпосередньо закріплюється на рівні Європейського Союзу – з останнього, у 2026 р. Європейська Комісія опублікувала спеціальні рекомендації щодо застосування Водної рамкової директиви під час дозвільних процедур для існуючих видів діяльності та нових проєктів, з особливим акцентом на гірничо-видобувний сектор [5]. Це зроблено з метою узгодження застосування водного законодавства при реалізації стратегічних проєктів, у тому числі пов'язаних з видобутком та переробкою критичної сировини, без зниження рівня охорони вод. Це має принципове значення, оскільки європейська модель управління водними ресурсами побудована на необхідності запобігання погіршення стану водних об'єктів та досягнення їх належного екологічного, хімічного, а для підземних вод – ще і кількісного стану. Таким чином, при оцінці нового гірничо-видобувного проєкту повинно враховуватись не лише його потреби у воді, але й можливий вплив водозабору, водовідливу, скидання вод, зміни умов живлення та розвантаження території, а також надходження забруднювальних речовин на конкретні масиви поверхневих і підземних вод.

У даному контексті сталий розвиток сектору критичних мінералів передбачає перехід від традиційного підходу суто забезпечення гірничого підприємства необхідною кількістю води до комплексного управління водними ресурсами протягом повного життєвого циклу видобувного об'єкта. Новий підхід охоплює комплексне оцінювання доступних поверхневих і підземних водних ресурсів, прогнозування змін водного балансу, раціоналізацію забору води, повторне використання технологічних вод, контроль якості шахтних і кар'єрних вод, моніторинг стану водних об'єктів та планування водного режиму території після завершення видобутку.

Це дозволяє розглядати воду не як допоміжний виробничий ресурс при освоєнні критичної мінеральної сировини, а як стратегічний природний ресурс і

невід'ємну складову сталого освоєння родовищ. Такий підхід формує основу для подальшого розгляду ролі води безпосередньо у технологічних процесах видобутку та переробки критичних мінералів.

Контрольні запитання до розділу 7:

1. Яку роль відіграють водні ресурси у видобутку та переробці критичної мінеральної сировини?

2. Чому доступність водних ресурсів може бути обмежувальним фактором для реалізації гірничодобувних проєктів?

3. Що означає поняття «водний стрес» та які чинники сприяють його формуванню?

4. У чому полягає відмінність між водним стресом, водною кризою та водним банкрутством?

5. Чому виснаження підземних вод може мати довготривалі або частково незворотні наслідки?

6. Наведіть приклади водного банкрутства або тривалого виснаження водних ресурсів, які відомі у світі. Які природні та антропогенні чинники їх зумовили?

7. Чому показники використання води суттєво відрізняються для різних видів мінеральної сировини?

8. Чому повторне використання та очищення технологічних вод є важливими складовими сталого освоєння критичної мінеральної сировини?

9. Поясніть твердження: «Забезпеченість території запасами критичної мінеральної сировини ще не означає можливості її сталого освоєння без урахування стану водних ресурсів».

Список рекомендованої літератури до розділу 7:

1. European Parliament & Council of the European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw

materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. Official Journal of the European Union.

2. International Energy Agency. (2026). Global critical minerals outlook 2026. IEA.

3. Bredariol, T. de O. (2022, March 22). Reducing the impact of extractive industries on groundwater resources. International Energy Agency.

4. International Energy Agency. (2023). Sustainable and responsible critical mineral supply chains: Guidance for policy makers. IEA.

5. European Commission. (2026). Guidance for the implementation of the Water Framework Directive during the permitting of new projects and existing activities with a particular focus on the mining sector (Commission Notice C/2026/2836).

6. Madani, K. (2026). Global water bankruptcy: Living beyond our hydrological means in the post-crisis era. United Nations University Institute for Water, Environment and Health. https://doi.org/10.53328/INR26KAM001

7. Madani, K. (2026). Water bankruptcy: The formal definition. Water Resources Management, 40, Article 78. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04484-0

8. U.S. Bureau of Reclamation. (n.d.). Colorado River Basin: Post-2026 operational guidelines and strategies. U.S. Department of the Interior.

9. Mishra, V., Dangar, S., Tiwari, V. M., Lall, U., & Wada, Y. (2024). Summer monsoon drying accelerates India’s groundwater depletion under climate change. Earth’s Future, 12, e2024EF004516. https://doi.org/10.1029/2024EF004516

10. World Bank. (2024, December 4). Greening the desert: The role of landscape restoration in Uzbekistan’s battle against sand and dust storms.

РОЗДІЛ 8. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ВОДНОЇ РАМКОВОЇ ДИРЕКТИВИ ЄС ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ГІРНИЧО-ВИДОБУВНОМУ СЕКТОРІ

У розділі викладено основні положення Водної рамкової директиви ЄС та особливості їх застосування у гірничо-видобувному секторі. Розглянуто екологічні цілі Директиви, принцип недопущення погіршення стану вод та підходи до оцінювання стану поверхневих і підземних вод з урахуванням можливого впливу гірничої діяльності.

Основним нормативним документом, що формує спільні засади управління та охорони вод у Європейському Союзі, є Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 жовтня 2000 р., яка встановлює рамки діяльності Співтовариства у сфері водної політики, або Водна рамкова директива (Water Framework Directive, тут і далі – ВРД) [1]. Ця Директива охоплює внутрішні поверхневі, перехідні, прибережні та підземні води й формує інтегрований підхід до їх охорони та управління. Вода тут розглядається не лише як ресурс для господарського використання, а як повноцінна складова природної системи, стан якої необхідно зберігати або відновлювати. Тому центральними завданнями ВРД є недопущення погіршення стану водних об’єктів та досягнення ними доброго стану, а їх реалізація здійснюється через плани управління річковими басейнами та відповідними програмами заходів [1, 2].

Для гірничодобувного сектору ці положення мають особливе значення, адже на сьогоднішній день при плануванні розробки нового родовища недостатньо лише визначити необхідний обсяг водопостачання чи розрахувати систему водовідливу, необхідно встановити, які саме масиви поверхневих і підземних вод можуть зазнати впливу, яким є їх початковий стан, чи може реалізація проєкту спричинити його погіршення і як цьому запобігти.

Цей зв’язок набув особливого значення у 2026 р., коли Європейська Комісія опублікувала спеціальне Керівництво щодо впровадження ВРД під час видачі дозволів для нових проєктів та чинної діяльності, з особливим акцентом на гірничодобувному секторі [3]. Даний документ спрямований на зменшення

невизначеності щодо процедур і критеріїв оцінки, необхідних для застосування вимог ВРД під час видачі дозволів на нові проєкти та існуючі види діяльності, і особлива увага в ньому приділяється саме гірничодобувному сектору та проєктам, пов'язаним із критичною мінеральною сировиною. Європейська Комісія наголошує, що зменшення залежності ЄС від імпорту критичної сировини має відбуватися одночасно з підвищенням водної стійкості, а також зазначає, що відмінності у практиці застосування ВРД між державами-членами можуть впливати на вартість і можливість отримання дозволів, а отже, і на інвестиційні рішення у секторі критичної сировини [3].

Термін водна стійкість (water resilience) у контексті освоєння критичної сировини означає здатність водних систем зберігати свої основні функції та забезпечувати достатню кількість води належної якості в умовах зростання водоспоживання, техногенного навантаження, змін клімату та інших зовнішніх впливів [4]. Вона передбачає не лише захист водних ресурсів від виснаження і забруднення, а й здатність водних систем адаптуватися до змін та відновлюватися після порушень. При видобутку та переробці критичної сировини питання водної стійкості набуває особливого значення, оскільки ці процеси можуть супроводжуватися значним водоспоживанням, водовідливом, зміною рівнів підземних вод, утворенням шахтних і кар'єрних вод, а також мати високий ризик забруднення поверхневих і підземних вод.

У практичному аспекті підвищення водної стійкості передбачає зменшення водоспоживання, повторне та оборотне використання води, запобігання її забрудненню, контроль водовідливу, моніторинг поверхневих і підземних вод, відновлення порушених водних систем та врахування водних ризиків на всіх етапах життєвого циклу гірничодобувного об'єкта, що дозволяє поєднати потребу ЄС у критичній сировині з цілями охорони водних ресурсів, закладеними у Європейській стратегії водної стійкості [4].

Таким чином, водна стійкість є ширшим стратегічним орієнтиром, але конкретні вимоги до охорони та управління поверхневими і підземними водами в ЄС визначаються насамперед Водною рамковою директивою. Для проєктів з

видобування критичної сировини це означає необхідність оцінювати їх вплив на водні об’єкти та не допускати погіршення їх стану.

8.1. Мета, принципи та сфера застосування Водної рамкової директиви ЄС

Як було зазначено, Водна рамкова директива була прийнята з метою створення єдиної системи охорони та управління водами в межах Європейського Союзу, сформувавши перехід від управління окремими видами водокористування та забруднення до комплексного управління водними ресурсами на основі стану водних об’єктів і природних меж річкових басейнів [1].

Відповідно до ВРД її положення поширюються на внутрішні поверхневі води, перехідні води, прибережні води та підземні води [1]. Одним з фундаментальних понять ВРД є водний об’єкт, що виступає базовою одиницею, для якої визначають стан, встановлюють екологічні цілі та оцінюють ефективність природоохоронних заходів [1].

Для поверхневих вод виділяють окремі масиви – чітко визначені частини водних об’єктів, наприклад річка або її частина, озеро, водосховище, а також перехідні чи прибережні води. Для підземних вод використовується поняття масиву підземних вод, тобто окремого об’єму підземних вод у межах одного або декількох водоносних горизонтів [1]. Для гірничодобувної діяльності такий підхід має принципове значення, наприклад, водовідлив з кар’єру може здійснюватися локально, однак сформована депресійна воронка здатна поширюватися за межі гірничого відводу, тобто межі розташування гірничого підприємства і межі його гідрогеологічного впливу, в більшості випадків, не збігаються. Наслідком може бути зміна рівнів і напрямків руху підземних вод, взаємозв’язку між підземними та поверхневими водами або умовами живлення залежних екосистем на десятки кілометрів навколо гірничого підприємства.

Також центральне місце у Водній рамковій директиві займають екологічні цілі, визначені статтею 4 [1]. Їх загальна логіка може бути представлена двома взаємопов’язаними вимогами:

1. Не допустити погіршення існуючого стану водного об’єкта.

2. Досягти та підтримувати добрий стан водного об’єкта.

Для поверхневих вод добрий стан досягається за умови, що екологічний і хімічний стан оцінюються щонайменше як добрі, а для підземних вод оцінка здійснюється за кількісним і хімічним станом, і кожен з них також має бути щонайменше добрим. При цьому загальний стан масиву вод визначається за гіршою зі складових, тобто для поверхневих вод – за гіршим з екологічного та хімічного станів, а для підземних – за гіршим з кількісного та хімічного. Такий підхід, закладений у Водній рамковій директиві, залишається основою оцінки стану поверхневих і підземних вод у ЄС та підтверджується актуальними документами Європейської Комісії [1, 2]. Наприклад, результати оцінки стану вод у ЄС свідчать (рис.8.1), що доброго або кращого екологічного стану досягли 37% поверхневих вод, тоді як у доброму хімічному стані перебувають лише 29% з них, а для підземних вод 77% їх площі характеризуються добрим хімічним станом [5].



Рисунок 8.1 – Хімічний та екологічний стан поверхневих і підземних вод у Європі [5].

Кількісний аспект підземних вод особливо важливий для гірничо-видобувних територій, де принципово змінений баланс між поповненням і вилученням підземних вод, положенням рівнів та умов їх розвантаження. Хімічний аспект пов’язаний із можливістю надходження забруднювальних речовин із гірничих виробок, відвалів, хвостосховищ, технологічних майданчиків тощо. Це показує, що один гірничо-видобувний об’єкт потенційно впливає як на кількісні, так і на якісні характеристики водного середовища, що вимагає комплексної оцінки його впливу.

8.2. Принцип недопущення погіршення стану вод

Одним з фундаментальних положень ВРД є принцип недопущення погіршення стану водних об'єктів [1], і його значення полягає в тому, що екологічна політика ЄС спрямована не тільки на відновлення вже порушених водних систем, а й нові види діяльності повинні оцінюватися з позиції того, чи призведе їх реалізація до погіршення існуючого стану водного об'єкта. Ця вимога формує безпосередній зв'язок між ВРД і процедурою надання дозволів на реалізацію нових проєктів, наприклад у сфері видобутку критичної сировини.

Для гірничодобувного сектору питання можна сформулювати наступним чином – чи здатний запланований видобуток мінеральної сировини призвести до погіршення стану одного або декількох масивів поверхневих чи підземних вод і в якому обсязі? Відповідь на нього потребує комплексного підходу, а саме встановлення вихідного стану водних об'єктів, визначення джерел і механізмів потенційного впливу, прогнозування його поширення у просторі та часі, а також оцінки ефективності запланованих заходів із повним запобігання або мінімізації негативних змін тощо. Важливою є оцінка можливості погіршення стану вод саме на етапі до надання дозволу користування та початку реалізації проєкту. У [3] передбачено можливість проведення попереднього скринінгу потенційного впливу проєкту на водні об'єкти. Якщо за його результатами буде встановлено, що реалізація проєкту не призведе до погіршення стану водного об'єкта та не перешкоджатиме досягненню визначених екологічних цілей, проведення поглибленої оцінки не вимагається, якщо ж виявлено ризик такого погіршення, то необхідно провести детальну оцінку проєкту. Для гірничо-видобувного проєкту послідовність такої оцінки доцільно представити схемою, що зображена на рис. 8.2.

При оцінці також враховуються заходи із запобігання та мінімізації впливу, наприклад оборотне водопостачання, очищення шахтних і кар'єрних вод, контроль фільтрації з хвостосховищ, перехоплення забруднених вод, оптимізацію водовідливу та моніторинг підземних та поверхневих вод.



Рисунок 8.2 – Послідовність оцінки можливого впливу гірничо-видобувного проєкту на стан водних об'єктів у процесі дозвільної процедури. Складено авторами за [3].

Вимоги Водної рамкової директиви поширюються не лише на нові проєкти, відповідно до [3], розглядаються також існуючі види діяльності та може здійснюватися перегляд дозволів, наприклад у випадках, коли необхідні додаткові заходи для запобігання погіршенню стану вод. Таким чином, вплив на водні ресурси контролюється на всіх етапах життєвого циклу гірничо-

видобувного проєкту – від проєктування і початку робіт до експлуатації, закриття та подальшого моніторингу.

8.3. Оцінка стану поверхневих і підземних вод

Для реалізації принципу недопущення погіршення необхідно коректно встановити вихідний стан водного об'єкта та визначити, які його характеристики можуть змінитися внаслідок запланованої діяльності. Водна рамкова директива використовує різні складові оцінювання для поверхневих та підземних вод, як було описано в попередніх розділах (для поверхневих розглядається екологічний та хімічний стан, а для підземних – відповідно кількісний та якісний стани) [1]. Для гірничо-видобувного сектору особливого значення відіграє, в першу чергу, кількісний стан підземних вод, а його оцінка передбачає визначення ряду факторів, що стосуються порушення балансу їх ресурсів, небажаного впливу на пов'язані поверхневі води та залежні наземні екосистеми тощо [1, 6].

При розробці родовища водовідлив формує депресійну воронку та змінює в цілому гідродинамічний стан території, і наслідки його функціонування можуть поширюватися далеко за межі гірничого відводу. Тому важливими інструментами оцінки як діючого, так і закритого гірничо-видобувного підприємства є гідрогеологічна концептуальна модель та прогнозне моделювання.

Другим важливим компонентом є хімічний стан підземних вод, і європейський підхід передбачає запобігання або обмеження надходження забруднювальних речовин, застосування стандартів якості та порогових значень, а також виявлення значних і стійких тенденцій збільшення концентрацій забруднювальних речовин у водному середовищі [6]. На гірничо-видобувних територіях потенційними джерелами такого впливу є шахтні й кар'єрні води, відвали, хвостосховища, технологічні майданчики, і необхідно оцінювати не лише концентрації речовин у контрольних точках, а й умови їх швидкість та шляхи міграції у водоносних горизонтах.

Отже, оцінка відповідності гірничо-видобувного проєкту вимогам Водної рамкової директиви потребує коректного визначення вихідного стану водних об’єктів та прогнозування його можливих змін у часі та на різних етапах експлуатації родовища. Інформаційною основою такої оцінки є моніторинг поверхневих і підземних вод, який забезпечує дані для встановлення стану водних об’єктів, виявлення коротко- та довгострокових тенденцій їх змін, а також контролю фактичного впливу гірничої діяльності [1, 3].

8.4. Моніторинг поверхневих і підземних вод

Моніторинг є основним джерелом інформації для визначення стану водних об’єктів, виявлення змін та оцінки ефективності водоохоронних заходів. Відповідно 8 статті Водної рамкової директиви, держави-члени ЄС повинні створювати програми моніторингу, що забезпечують узгоджене та комплексне уявлення про стан вод у межах кожного району річкового басейну [1].

Відповідно Водної рамкової директиви, моніторинг виконує значно ширшу функцію, ніж періодичний контроль окремих показників якості води. Його результати використовують для класифікації водних об’єктів, встановлення коротко- та довгострокових тенденцій, виявлення антропогенних змін та обґрунтування програм заходів, необхідних для досягнення встановлених екологічних цілей [1, 2].

Для поверхневих вод передбачається система, що включає діагностичний (оглядовий), операційний та дослідницький види моніторингу [1]. Нижче наведено їх основні характеристики.

Діагностичний (оглядовий) моніторинг забезпечує загальну характеристику стану водних об’єктів, доповнює та перевіряє результати оцінки антропогенних впливів, а також дає змогу простежувати довгострокові зміни природного й антропогенного походження.

Операційний моніторинг застосовується насамперед для водних об’єктів, що мають ризик недосягнення встановлених екологічних цілей, дозволяючи

встановити їх фактичний стан та оцінити зміни, що відбуваються внаслідок реалізації запланованих програм заходів [1].

Дослідницький моніторинг застосовується у ситуації, коли причини погіршення стану водного об'єкта недостатньо вивчені, а також для встановлення масштабу та наслідків аварійного забруднення і обґрунтування необхідних заходів реагування [1].

Для гірничо-видобувних територій така диференціація особливо важлива, наприклад, якщо у водному об'єкті, що знаходиться нижче за течією від працюючого гірничо-видобувного підприємства фіксується погіршення якості води, саме дослідницький вид моніторингу може бути використаний для встановлення джерела та просторового поширення впливу забруднення.

Для підземних вод передбачається окрема оцінка їх кількісного та якісного стану. Мережа моніторингу повинна забезпечувати вичерпну інформацію для визначення кількісного стану масиву підземних вод, зокрема оцінку ресурсів підземних вод, а також виявлення їх довгострокових змін [1]. Мережа спостережень не повинна обмежуватися лише територією гірничо-видобувного підприємства. В більшості випадків, прогнозована зона впливу водовідливу поширюється за межі гірничого відводу, і пункти спостережень повинні дозволяти оцінити стан водоносного горизонту в межах усієї потенційної зони впливу, особливо поблизу поверхневих водних об'єктів та залежних від підземних вод екосистем.

Для оцінки хімічного стану підземних вод, виділяється діагностичний (оглядовий) та операційний види моніторингу. Діагностичний (оглядовий) моніторинг підземних вод використовується для підтвердження результатів оцінки впливів та встановлення довгострокових тенденцій. До базових параметрів належать вміст кисню, pH, електропровідність, нітрати та амоній; для масивів, що зазнають специфічного антропогенного навантаження, перелік показників доповнюється параметрами, характерними саме для відповідних джерел впливу. Операційний моніторинг проводиться для масивів підземних вод, що мають ризик недосягнення екологічних цілей і дає змогу уточнювати їх

хімічний стан та встановлювати наявність довгострокових, антропогенно зумовлених тенденцій збільшення концентрацій забруднювальних речовин [1]. Для гірничо-видобувних об'єктів перелік параметрів моніторингу має формуватися з урахуванням особливостей родовища, складу руд і вміщуючих порід, технологій видобутку і переробки, характеристик відходів тощо, що дозволяє перейти від формального контролю стандартного набору показників до моніторингу речовин, які дійсно можуть визначати вплив конкретного підприємства.

У контексті [3] моніторинг є важливою складовою прийняття та подальшого обґрунтування управлінських рішень протягом життєвого циклу гірничо-видобувного підприємства. Його значення проявляється вже на етапі дозвільної процедури, оскільки оцінка можливого впливу проєкту потребує вичерпної інформації про вихідний стан поверхневих і підземних вод та наявні антропогенні навантаження. Це є основою, відносно якої прогнозуються майбутні зміни водного та екологічного середовища в цілому та визначається ризик погіршення їх стану. При цьому, наголошується на доцільності використання вже наявної релевантної інформації та уникнення дублювання оцінок, якщо якість і кількість таких даних є достатніми для прийняття обґрунтованого рішення.

Для гірничо-видобувних підприємств необхідне забезпечення безперервності моніторингу, оскільки вплив підприємства на водне середовище змінюється протягом усього циклу їх роботи. Поглиблення кар'єру або розвиток шахтних виробок, розкриття водоносних горизонтів, зміна обсягів водовідливу та водоспоживання, формування відвалів і хвостосховищ, скидання або повторне використання вод можуть поступово змінювати гідродинамічні та гідрохімічні умови території. Тому оцінка, що була виконана на етапі проєктування, не може залишатися єдиною основою для контролю впливу підприємства протягом усього періоду його діяльності. Результати експлуатаційного моніторингу дають можливість порівнювати фактичні зміни стану водного середовища з тими, що були передбачені на етапі оцінки проєкту, що дозволяє перевіряти достовірність

прийнятих прогнозів, своєчасно виявити відхилення, уточнити прогнозні моделі та зкорегувати водоохоронні заходи.

Таким чином, завдання сучасного моніторингу полягає не тільки у фіксації сформованих змін, а і у своєчасному отриманні інформації, необхідної для запобігання небажаному розвитку процесів, що робить його частиною адаптивного управління об'єкта. Це дає можливість контролювати відповідність видобувної діяльності встановленим екологічним цілям Водної рамкової директиви на всіх етапах - під час отримання дозволу, в процесі експлуатації та на етапах закриття та післяексплуатаційного спостереження за об'єктом [1, 3].

Водночас дані моніторингу окремого гірничо-видобувного підприємства необхідно розглядати в широкому полі управління водними ресурсами, адже відповідно до принципів ВРД, таке управління здійснюється в межах районів річкових басейнів, для яких визначаються екологічні цілі, розробляються плани та програми заходів управління річковими басейнами [1, 2]. Це дозволяє перейти від контролю локальних змін на окремому об'єкті видобування до комплексного управління водними ресурсами та оцінки його внеску у формування загального стану водного середовища.

8.5. Басейновий принцип управління водними ресурсами у контексті видобутку критичної сировини

Одним із базових положень Водної рамкової директиви ЄС є організація управління водними ресурсами за басейновим принципом, територіальною основою управління є район річкового басейну, що охоплює поверхневі та підземні водні об'єкти (рис. 8.3). Для транскордонних басейнів ВРД передбачає координацію дій між державами, оскільки гідрологічні та гідрогеологічні процеси не обмежуються адміністративними або державними кордонами [1].

Основним інструментом реалізації басейнового принципу є план управління річковим басейном, що розробляється для кожного району річкового басейну та періодично переглядаються і оновлюються. Плани містять характеристику басейну і всіх водних об'єктів, інформацію про основні

антропогенні навантаження, результати моніторингу та оцінки стану вод, встановлені екологічні цілі, а також програми заходів, необхідних для їх досягнення [1, 2]. Тобто таких підхід дозволяє розглядати водний об'єкт не ізольовано, а як частину єдиної природної системи. Наприклад стан річки залежить не тільки від скидів у її русло, а й від ступеню та характеру взаємозв'язку з підземними водами, наявністю водозаборів, характеру землекористування, стану притоків, надходження забруднювальних речовин тощо.

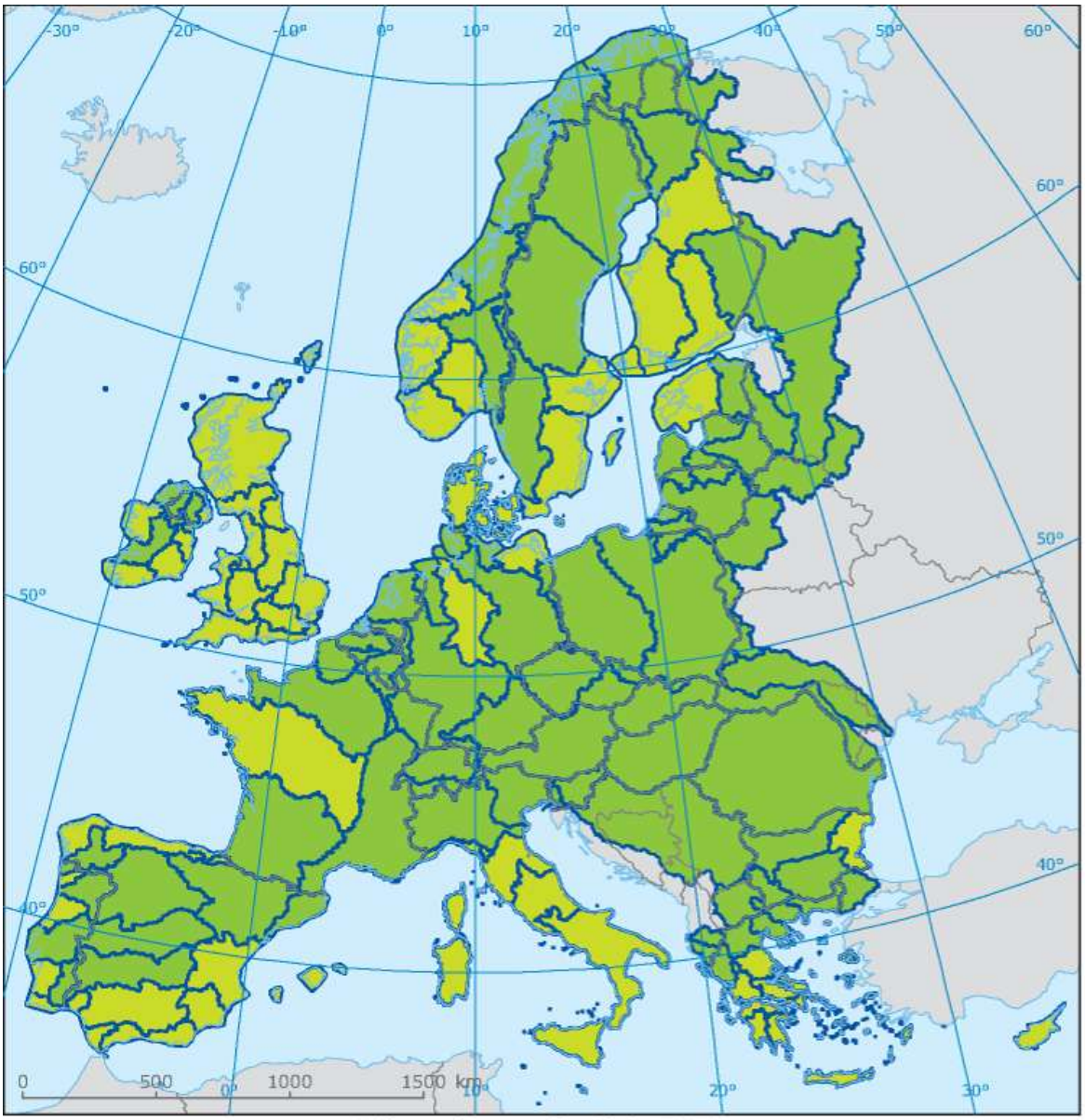


Рисунок 8.3 – Райони річкових басейнів Європи відповідно до Водної рамкової директиви ЄС. Джерело: European Environment Agency, WISE [6].

Як було зазначено у попередніх підрозділах, гірничовидобувна діяльність може впливати на водні ресурси на території, що значно перевищує межі самого підприємства, тому необхідно визначити масиви поверхневих і підземних вод, які потенційно можуть зазнати змін. Для кожного з них важливо враховувати існуючий стан, встановлені екологічні цілі та вже наявні антропогенні навантаження. Наприклад, якщо розробка родовища передбачає відкачування значних обсягів підземних вод, то цей вплив необхідно оцінювати з урахуванням інших водозаборів, що вже існують у межах відповідного масиву підземних вод. Важливим є не тільки прогнозоване зниження рівня підземних вод на полі шахти або кар'єру, а й можливість зміни водного балансу, скорочення підземного живлення поверхневих водних об'єктів та впливу на залежні екосистеми тощо. Саме тому, у [3] пов'язується оцінка нових проєктів із системою екологічних цілей ВРД та планами управління річковими басейнами. Зміна умов функціонування діючого гірничо-видобувного підприємства, розширення гірничих робіт або перегляд дозволу також можуть потребувати повторної оцінки впливу на водні об'єкти. Під час продовження або перегляду гірничо-видобувної діяльності дозвіл має враховувати доступні нові технології очищення та додаткові заходи з мінімізації впливу на довкілля. Детальніше практичне застосування басейнового принципу саме для гірничих територій буде розглянуто у наступному розділі.

Контрольні запитання до розділу 8:

1. Якою є основна мета Водної рамкової директиви ЄС?

2. Що таке масив поверхневих або підземних вод і чому саме він є базовою одиницею оцінки відповідно до ВРД?

3. За якими складовими оцінюється стан поверхневих і підземних вод відповідно до ВРД?

4. Яким чином гірничовидобувна діяльність може впливати на кількісний та якісний стан підземних вод?

5. Яку роль відіграють моніторинг і плани управління річковими басейнами у досягненні екологічних цілей відповідно ВРД?

Список рекомендованої літератури до розділу 8:

1. European Parliament & Council of the European Union. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities, L 327, 1–73.

2. European Commission. (n.d.). Water Framework Directive. Directorate-General for Environment.

3. European Commission. (2026). Guidance for the implementation of the Water Framework Directive during the permitting of new projects and existing activities with a particular focus on the mining sector (Commission Notice C/2026/2836). Official Journal of the European Union, 26 May 2026.

4. European Commission. (2025). European Water Resilience Strategy (COM(2025) 280 final). Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2779/0686902

5. European Environment Agency. (2024). Europe's state of water 2024: The need for improved water resilience (EEA Report No. 07/2024). European Environment Agency.

6. European Environment Agency. (2024). Groundwater chemical status. In EEA Signals 2024: Towards healthy and resilient waters in Europe.

7. European Environment Agency. (2024). EEA Signals 2024: Towards healthy and resilient waters in Europe: Infographics.

РОЗДІЛ 9. БАСЕЙНОВИЙ ПРИНЦИП УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ НА ПРИКЛАДІ ГІРНИЧО-ВИДОБУВНИХ РЕГІОНІВ

У розділі викладено основні принципи басейнового управління водними ресурсами в умовах гірничо-видобувних регіонів. Розглянуто особливості формування сукупного водогосподарського навантаження, наведено практичні приклади з європейських гірничих регіонів та визначено значення басейнового підходу при плануванні освоєння критичної мінеральної сировини.

9.1. Особливості формування водогосподарського навантаження у гірничо-видобувних регіонах

У гірничо-видобувних регіонах управління водними ресурсами ускладнюється тим, що в межах одного річкового басейну (або його частини) одночасно функціонує значна кількість водокористувачів і джерел техногенного навантаження. Наприклад, поряд із діючими підприємствами з видобутку та переробки мінеральної сировини можуть знаходитись закриті гірничі об’єкти, хвостосховища, відвали, промислові майданчики, населені пункти, сільськогосподарські території тощо. Для басейнового підходу управління принципово важливим є встановлення комплексної дії окремих джерел впливу в межах конкретного масиву поверхневих або підземних вод. Один водний об’єкт може одночасно перебувати під дією декількох значних навантажень, до яких належать точкові й дифузні джерела забруднення, робота водозаборів, зміни гідрологічного режиму тощо [1]. Отже, для управління водними ресурсами важливим є визначення ступеня внеску різних джерел у формування загального стану водного об’єкта.

Особливістю гірничо-видобувних об’єктів є можливість перенесення наслідків діяльності далеко за межі території їх роботи. Підприємство або група гірничих об’єктів можуть бути розташовані в одній частині басейну, тоді як погіршення характеристик водного середовища проявляється нижче за течією. Показовим у цьому відношенні є басейн Дунаю, де райони видобутку металевих

руд розташовані в різних частинах великої транскордонної водної системи (рис. 9.1). Дослідження міграції металів, пов'язаних із гірничо-видобувною діяльністю, показало, що забруднювальні речовини можуть переноситися на сотні кілометрів, у тому числі через державні кордони [2]. Для транскордонних річкових басейнів джерело впливу та водний об'єкт, що зазнає його наслідків, можуть знаходитися навіть у різних державах, тому передбачено координацію управління міжнародними районами річкових басейнів [3].

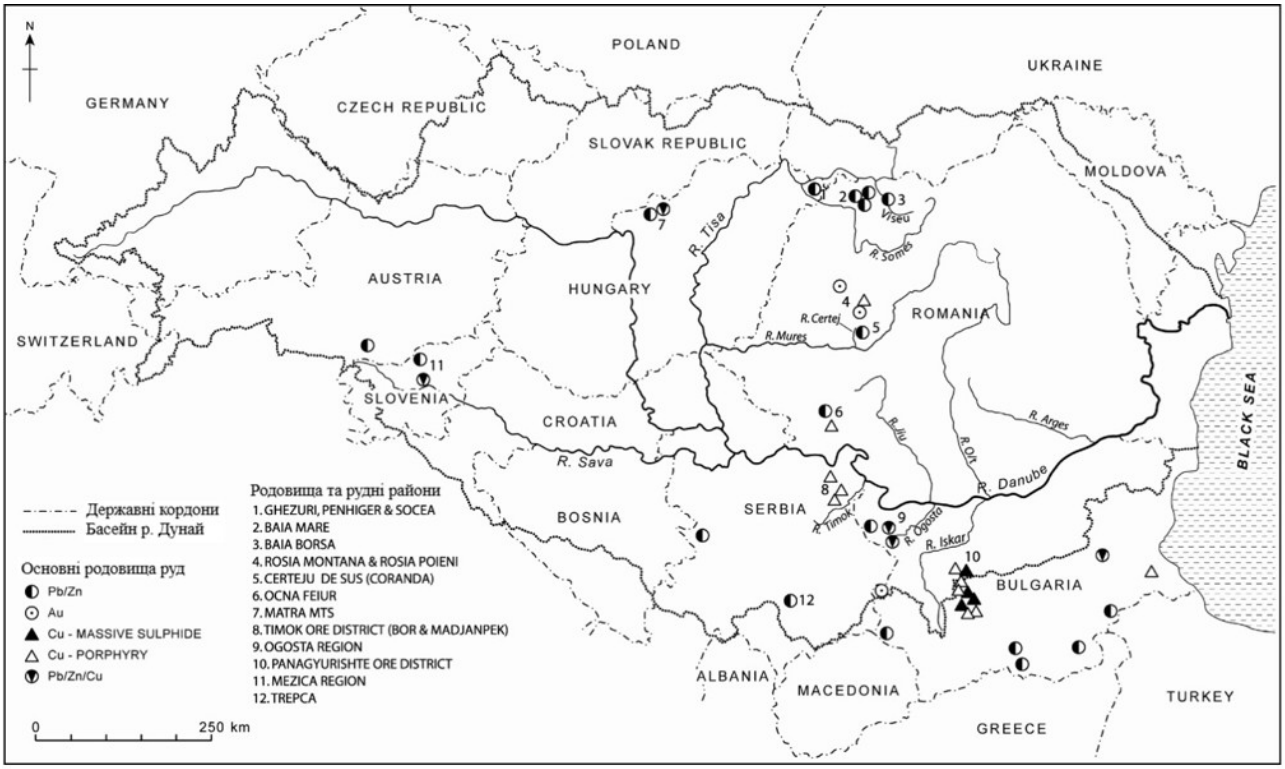


Рисунок 9.1 – Басейн річки Дунай та розташування основних родовищ металевих руд у його межах. Джерело: Bird et al. (2010) [2].

Ще однією характерною рисою старих гірничих регіонів є значна роль накопиченого історично-техногенного впливу. Закриття шахти (кар'єру) або припинення розробки родовища не означає автоматичного припинення її впливу на водне середовище, залишаючись джерелами техногенного навантаження протягом тривалого часу. У системі ВРД «старі» техногенні впливи розглядаються на одному рівні із сучасними джерелами, наприклад, у базах WISE для підземних вод разом із точковими та дифузними джерелами,

водозабором і змінами умов живлення виділяються також історичні та інші антропогенні навантаження [4]. Для гірничих басейнів це означає, що сучасний стан вод не завжди може бути пояснений лише сьогоднішньою діяльністю підприємств і при плануванні нових проєктів необхідно враховувати вже сформоване фонове техногенне навантаження.

Окремо необхідно розглянути питання конкуренції за водні ресурси. Басейновий підхід дозволяє також розглядати гірничодобувну діяльність у розрізі потреб інших водокористувачів. Тобто водні ресурси однієї території можуть використовуватися для питного водопостачання, промисловості, сільського господарства, енергетики та забезпечення потреб гірничих підприємств, при цьому частина цих ресурсів має залишатися недоторканою для підтримання залежних від них екосистем.

Тому питання доступності води для нового гірничо-видобувного проєкту не повинно зводитися суто до технічної можливості організації водозабору, як це було раніше. Необхідно оцінити загальний водний баланс території, всі вхідні та вихідні параметри, та співвідношення з додатковою потребою у воді, що з’явиться при розробці родовища. Значення та цінність такого підходу зростає в умовах посух останніх років, а оновлене керівництво Європейської Комісії з управління річковими басейнами в умовах зміни клімату прямо вказує, що існуючі техногенні навантаження, зокрема водозабір та забруднення, посилюються прямими та опосередкованими кліматичними змінами [5].

Це особливо актуально у контексті видобутку критичної мінеральної сировини, бо розміщення перспективного родовища в певному басейні ще не означає, що водні ресурси цього басейну можуть без обмежень забезпечити його освоєння.

Таким чином, головна відмінність басейнового підходу полягає не просто у збільшенні території, що підлягає оцінці, а змінюється сам об’єкт управління – водний об’єкт і річковий басейн, стан яких формується сукупною дією природних і антропогенних факторів. Це дозволяє визначати, які частини басейну є найбільш навантаженими, як і де є поєднання сучасних та історичних

джерел впливу, які водні об’єкти є найбільш уразливими до змін, та де додаткове навантаження може створювати найбільші проблеми для досягнення встановлених екологічних цілей. Це повинно бути основою при плануванні нових проєктів з освоєння критичної мінеральної сировини в регіонах, де водні ресурси вже інтенсивно використовуються або зазнали тривалого техногенного впливу (в тому числі виснаження) [6].

Отже, басейновий підхід до гірничо-видобувної діяльності є не просто масштабуванням локальної оцінки впливу об’єкту на більшу територію. Його основне завдання полягає у визначенні ролі конкретного гірничо-видобувного об’єкта в загальній системі техногенних навантажень басейну, встановленні водних об’єктів, для яких ці навантаження є значущими, та обґрунтуванні пріоритетних заходів управління. Для нових проєктів критичної мінеральної сировини такий підхід дозволяє ще на стадії планування врахувати не лише потреби самого підприємства, а й фактичний стан і допустимий рівень додаткового навантаження на водні ресурси території.

9.2. Практичні кейси басейнового управління у гірничих регіонах Європи

Практичне значення басейнового підходу найкраще видно у гірничих регіонах, де наслідки видобутку виходять за межі окремого підприємства та потребують узгоджених рішень на рівні басейну водозбору. Європейський досвід демонструє різні варіанти вирішення таких ситуацій: від довготривалого забруднення вод історичними гірничими об’єктами до масштабної перебудови водного режиму територій у процесі закриття кар’єрів. Далі розглянемо декілька показових прикладів та застосування вищеозначених підходів.

Одним із найбільш показових прикладів є Іберійський піритовий пояс – транскордонний гірничорудний регіон на південному заході Піренейського півострова, що простягається через території Іспанії та Португалії від Андалусії до Атлантичного узбережжя Португалії. У його іспанській частині через тривалий видобуток сульфідних руд сформувалась значна кількість покинутих

шахт, відвалів та інших гірничо-видобувних об’єктів. Особливо виражений вплив спостерігається в басейні річки Одіель, де кислі шахтні води з цих об’єктів надходять до єдиної річкової мережі [7]. Просторове положення басейну Одіелю та його місце у структурі гідрографічного району Тінто-Одіель-П’єдрас наведено на рисунку 9.2.

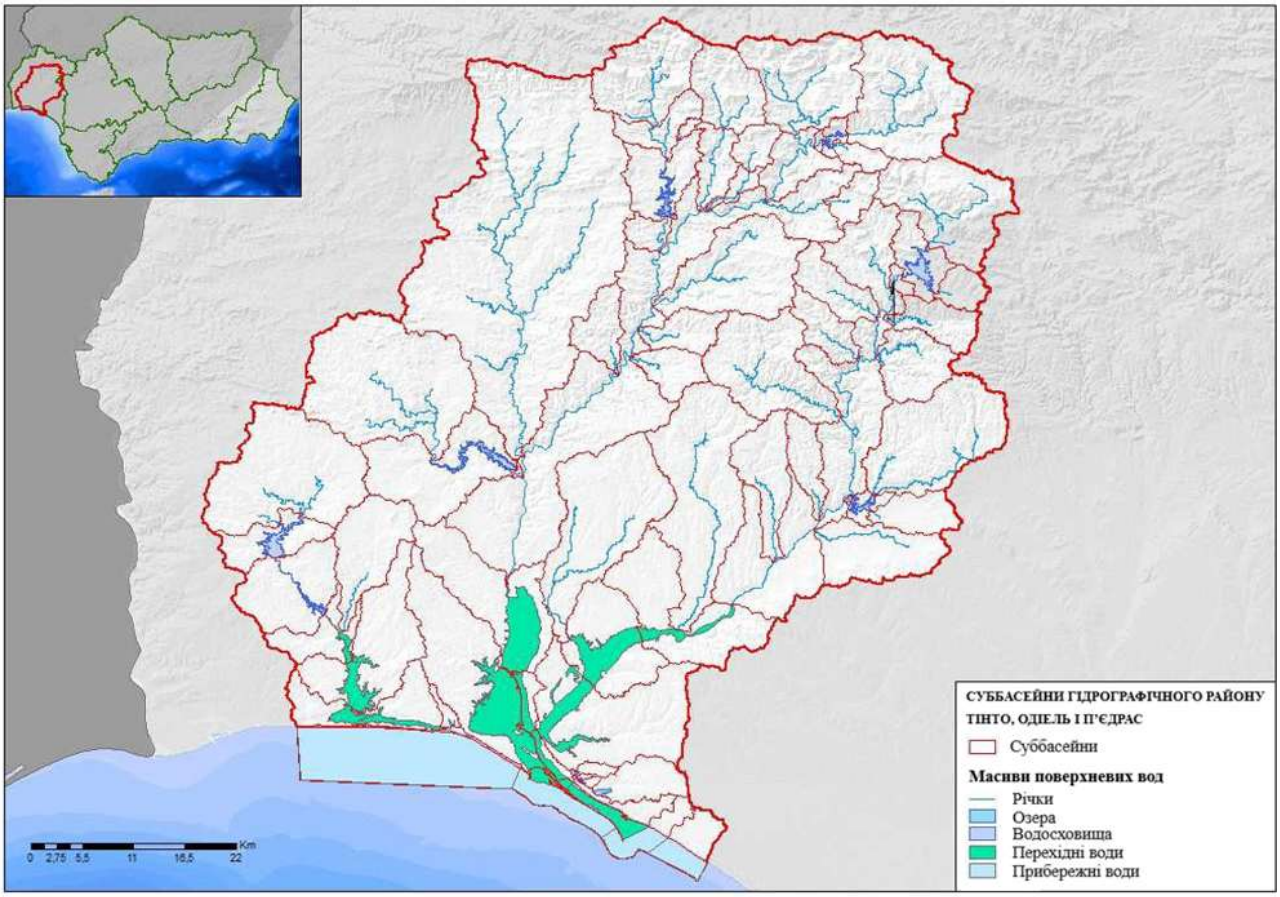


Рисунок 9.2 – Суббасейни гідрографічного району Тінто, Одіель і П’єдрас та основні масиви поверхневих вод. Джерело: Junta de Andalucía [8].

Наявна проблема не могла бути вирішена очищенням одного скиду або рекультивацією одного гірничого об’єкта, оскільки навантаження формувалось через вплив великої кількості розосереджених джерел. Тому першочерговим стало визначення відносного внеску кожного джерела забруднення та встановлення пріоритетності відновлювальних заходів. І прикладом реалізації такого підходу став проєкт LIFE ETAD (Ecological Treatment of Acid Drainage), реалізований в Андалусії, що був спрямований на розробку та демонстрацію в

реальних умовах пасивної технології очищення вод, забруднених кислотним шахтним дренажем. В основу технології очищення було покладено використання дисперсного лужного субстрату, взаємодія з яким забезпечує нейтралізацію кислотності та осадження металів без значних енергетичних витрат [8]. З погляду басейнового управління цей приклад демонструє важливість пріоритизації джерел впливу, адже за наявності великої кількості покинутих гірничих об'єктів одночасне відновлення всіх ділянок практично неможливе, тому басейновий аналіз дозволяє визначити ті джерела, скорочення надходження забруднювачів з яких може забезпечити максимальне покращення стану річкової системи.

Інший тип проблеми характерний для буровугільних районів Німеччини, адже тут басейнове управління пов'язане не стільки з одним джерелом забруднення, скільки з масштабною трансформацією водного режиму після десятиліть розробки родовищ та водовідливу. Показовою є ситуація в басейні річки Шпрее, де за наведеними в [9] даними, у літній період до 40 % її стоку може формуватися за рахунок вод, що відкачуються під час осушення буровугільних кар'єрів. Відповідно, у зв'язку з поступовим завершення видобування та скороченням водовідливу цей компонент річкового стоку (штучно сформований) зменшується. Одночасно припинення осушення та поступове відновлення рівнів підземних вод створюють іншу проблему, а саме – підземні води починають взаємодіяти з породами, геохімічні умови яких було змінено внаслідок тривалого осушення та окиснення сульфідних мінералів, і це супроводжується надходженням заліза, сульфатів та інших компонентів до підземних і поверхневих вод, формуючи нові ризики вже після завершення фази активного видобутку сировини [9]. Це демонструє, що припинення гірничо-видобувної діяльності не означає негайне зменшення навантаження на екологічний стан регіону і в цілому водогосподарських проблем. Природно-техногенна система, яка десятиріччями функціонувала в умовах штучно знижених рівнів підземних вод і значних обсягах водовідливу, переходить до нового кількісного та якісного гідродинамічного станів.

Показовим є також інший приклад з Німеччини, басейни річок Верра та Везер, де тривалий видобуток і переробка калійних солей супроводжувалися утворенням значних обсягів високомінералізованих вод і солевмісних відходів. Надходження цих вод до річкової мережі, вимивання солей атмосферними опадами з відвалів та подальша їх міграція з поверхневим та підземним стоком сприяли збільшенню концентрації розчинених солей у водах р.Верри та Везер. Проблема засолення цих річок внаслідок видобутку калійних солей була настільки суттєвою, що її вирішення окремо передбачили в плані управління річковим басейном Везеру [10]. Це вже дуже наочний приклад того, як конкретна гірничовидобувна проблема інтегрується безпосередньо у систему планування управління річковим басейном.

Перші два приклади демонструють необхідність управління наслідками вже переважно закінченої гірничо-видобувної діяльності, тоді як для критичної мінеральної сировини завдання на сьогодні інше – басейновий підхід доцільно застосовувати до того, як нове навантаження сформувалося. Цей аспект набув особливої актуальності після прийняття Critical Raw Materials Act і активізації нових гірничо-видобувних та переробних проєктів у Європі, а у 2026 році Європейська Комісія прямо пов’язала процедури оцінки нових гірничих проєктів із виконанням вимог ВРД [6].

Важливо, що сучасний європейський підхід поступово поширюється і на оцінку водного сліду ланцюгів виробництва сировини, тобто використання води розглядається у ширшому контексті ніж було раніше – безпосередньо на гірничому або переробному підприємстві. Водночас саме ВРД визначає вимоги до стану водних об’єктів і басейнового планування [11]. Для нових проєктів критичної мінеральної сировини європейський досвід дозволяє перейти від реактивної моделі (коли водогосподарські проблеми вирішувались після їх виникнення), до попереджувального басейнового планування.

Розглянуті приклади показують різні функції басейнового управління: в Іберійському піритовому поясі – в пріоритеті відновлення території з великою кількістю історичних джерел забруднення, у буровугільних районах Німеччини

необхідне управління довгостроковою перебудовою водного режиму після припинення видобутку. У басейнах Верри та Везеру басейнове планування стало інструментом вирішення конкретної регіональної проблеми, пов'язаної з гірничою діяльністю, а для нових проєктів критичної мінеральної сировини цей самий принцип набуває превентивного значення, дозволяючи врахувати водні обмеження ще до початку реалізації проєкту.

9.3. Значення басейнового підходу для освоєння критичної мінеральної сировини

Розвиток власної сировинної бази Європейського Союзу передбачає збільшення обсягів видобутку та переробки критичної мінеральної сировини. Водночас реалізація нових гірничо-видобувних проєктів відбувається в межах територій, де водні ресурси вже повноцінно використовуються населенням, промисловістю, сільським господарством та іншими секторами економіки, тому оцінка водозабезпеченості перспективного родовища тільки за наявністю поблизу водного об'єкта є недостатньою.

Для гірничого проєкту поняття «доступність водних ресурсів» доцільно розглядати як можливість забезпечити необхідну кількість води відповідної якості протягом всього життєвого циклу підприємства без неприйнятного збільшення навантаження на водну систему басейну. Це важливо з огляду на те, що потреба у воді суттєво залежить від виду сировини, характеристик руди, технології її збагачення та подальшої переробки. Водоспоживання при переробці мінеральної сировини характеризується значною варіабельністю, а зниження вмісту корисного компонента в рудах може потребувати більш інтенсивної технології переробки і, відповідно, збільшення потреб у воді [11]. Важливим є не тільки середньорічний обсяг доступних ресурсів, а й їх сезонні зміни, оскільки періоди найбільшої потреби підприємства у воді можуть збігатися з періодами її дефіциту для інших користувачів.

Важливим є врахування стану конкретних масивів поверхневих і підземних вод, тому що один і той самий за масштабами водозабір або скид може

мати різне значення в різних басейнах залежно від їх запасів, існуючого рівня використання ресурсів та сукупності інших навантажень. Це робить водогосподарську допустимість гірничого проєкту територіально специфічною і не може визначатися виключно його виробничими характеристиками. Басейновий підхід у цьому контексті має ще одну важливу перевагу, дозволяючи врахувати кумулятивний характер майбутнього розвитку району видобутку. Тобто, якщо в одному басейні планується кілька проєктів з видобутку або переробки критичної сировини, оцінка кожного з них окремо не буде відображати сумарного навантаження на водні об'єкти. Одним з напрямків зменшення такого навантаження є скорочення потреби у свіжій воді шляхом повторного та каскадного її використання, на сучасних гірничо-видобувних підприємствах очищені виробничі води можуть повторно використовуватися у технологічних процесах із нижчими вимогами до їх якості [11]. У басейнах із дефіцитом водних ресурсів подібні технологічні рішення набувають не лише природоохоронного, а й стратегічного значення для можливості реалізації подібних проєктів.

Контрольні запитання до розділу 9:

1. У чому полягає басейновий принцип управління водними ресурсами?
2. Чому вплив гірничо-видобувного підприємства на водні ресурси необхідно оцінювати не лише в межах його промислового майданчика?
3. Що таке кумулятивне водогосподарське навантаження і чому воно особливо важливе для гірничих регіонів?
4. Як розташування декількох гірничих об'єктів у межах одного річкового басейну може впливати на поверхневі та підземні води?
5. Чому басейновий підхід має особливе значення при плануванні нових проєктів з освоєння критичної мінеральної сировини?

Список рекомендованої літератури до розділу 9:

1. European Environment Agency. (n.d.). Pressures and impacts. WISE Freshwater.

2. Bird, G., Brewer, P. A., & Macklin, M. G. (2010). Management of the Danube drainage basin: Implications of contaminant-metal dispersal for the implementation of the EU Water Framework Directive. International Journal of River Basin Management, 8(1), 63–78. https://doi.org/10.1080/15715121003715115

3. European Parliament & Council of the European Union. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy (consolidated version, 2026). Official Journal of the European Communities, L 327, 1–73.

4. European Environment Agency. (n.d.). WFD groundwater bodies–Significant pressure types [Spatial dataset]. WISE.

5. European Commission, Directorate-General for Environment. (2024). River basin management in a changing climate (CIS Guidance Document No. 24). European Commission.

6. European Commission. (2026). Guidance for the implementation of the Water Framework Directive during the permitting of new projects and existing activities with a particular focus on the mining sector (Commission Notice C/2026/2836).

7. Grande, J. A., Santisteban, M., de la Torre, M. L., Dávila, J. M., & Pérez-Ostalé, E. (2018). Map of impact by acid mine drainage in the river network of the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). Chemosphere, 199, 269–277. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.047

8. Junta de Andalucía. (n.d.). LIFE ETAD–Ecological treatment of acid drainage (LIFE12 ENV/ES/000250).

9. European Commission. (2025). Assessment of the third River Basin Management Plans–Member State: Germany (Commission Staff Working Document SWD(2025) 25).

10. European Commission. (2019). Second River Basin Management Plans–Member State: Germany (Commission Staff Working Document SWD(2019) 41 final).

11. European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). Raw Materials Information System: Water.

РОЗДІЛ 10. ВОДНІ РИЗИКИ ПРИ ВИДОБУТКУ ТА ПЕРЕРОБЦІ КРИТИЧНИХ МІНЕРАЛІВ

У розділі викладено основні положення щодо формування водних ризиків при видобутку та переробці критичної мінеральної сировини. Розглянуто кількісні, якісні, аварійні та кліматичні ризики, чинники, що визначають їх рівень, та заходи щодо їх запобігання і зменшення.

10.1. Загальні відомості про водні ризики при освоєнні КМС

Водні ризики є одним із суттєвих факторів, що визначають екологічну прийнятність і стабільність реалізації проєктів з видобутку та переробки критичної мінеральної сировини. Підприємствам сировинного сектору необхідна вода у необхідній кількості, у необхідний момент і відповідної якості, і водні потреби суттєво відрізняються залежно від виду сировини, технології та локальних умов родовища. Навіть за порівняно невеликої частки в загальному водозаборі, потреби гірничо-видобувного підприємства може істотно впливати на доступність води на локальному рівні. Це дозволяє розглядати водний ризик не просто як факт використання води або наявність потенційного джерела забруднення, а як поєднання небезпечного чинника, умов його реалізації та можливих наслідків для водного середовища, екосистем в цілому або функціонування самого підприємства.

Для проєктів критичної мінеральної сировини доцільно виділити чотири взаємопов’язані групи водних ризиків:

1. Кількісні ризики, які пов’язані з недоступністю водних ресурсів або зміною їх кількісних характеристик. Сюди можна віднести дефіцит води, сезонне скорочення її доступності, конкуренцію між водокористувачами та залежність виробництва від стабільного водопостачання. Значення цієї групи ризиків підтверджує глобальне розміщення гірничих підприємств, наприклад є особливо висока вразливість виробництва міді та літію до водного стресу [1-2].

2. Якісні ризики, що виникають коли діяльність підприємства може спричинити забруднення поверхневих або підземних вод. Для сировинного

сектору серед потенційних факторів є метали, небезпечні хімічні речовини, виробничі стічні води, поверхневий стік із гірничих територій та витоки з об'єктів зберігання відходів [3]. Особливістю гірничих територій є поєднання точкових і дифузних джерел впливу.

3. Аварійні ризики відносно рідкі, але мають значні наслідки. Сюди можна віднести аварійні скиди, переливи забруднених вод, пошкодження гідротехнічних споруд і порушення функціонування систем поводження з гірничими відходами. Наслідки можуть поширюватися далеко за межі виробничого майданчика, особливо якщо забруднювальні речовини потрапляють до річкової мережі або водоносних горизонтів. Також значні наслідки забруднень у водному та грунтовому середовищах можуть бути пов'язані саме з аваріями, причинами яких поряд із конструктивними й експлуатаційними недоліками можуть бути інтенсивні опади та сейсмічні явища [3].

4. Кліматичні ризики, які можуть посилювати вплив всіх попередніх груп. Посухи зменшують доступність водних ресурсів, екстремальні опади та повені збільшують навантаження на системи водовідведення і споруди зберігання відходів тощо.

При цьому зазначені групи не є ізольованими, наприклад, тривала посуха одночасно зменшує доступність води для виробництва, підсилює конкуренцію між водокористувачами та може вимагати переходу на альтернативні джерела водопостачання. Екстремальні опади, навпаки, можуть створювати надлишок води на промисловому майданчику, збільшуючи ризик аварійного надходження забруднених вод у навколишнє природнє середовище. Отже, один природний або техногенний фактор може формувати ланцюг взаємопов'язаних водних ризиків.

Для критичної мінеральної сировини важливо також розрізняти ризик для водного середовища та ризик для самого сировинного проєкту. У першому випадку об'єктом ризику є поверхневі й підземні води, водні та залежні екосистеми й інші водокористувачі, а у другому – це стабільність виробництва, можливість підтримувати технологічні процеси та, у ширшому масштабі,

надійність постачання критичної сировини. Ці аспекти тісно пов'язані, тому сучасне управління водними ресурсами у гірничовидобувному секторі має забезпечувати одночасно і охорону водного середовища і зменшувати водозалежність виробництва. Це особливо актуально з огляду на фактичні тенденції у секторі, наприклад у 2019-2022 рр. серед великих гірничих компаній було задекларованe зростання споживання води приблизно на 25 %, а у 2024 р. близько 7 % світового виробництва міді перебувало під ризиком порушення через повені або посухи [1-3]. Це показує, що водні ризики мають не лише природоохоронне, а економічне та стратегічне значення для розвитку критичної мінеральної сировини.

Особливо показовими є мідь і літій, значна частина видобутку яких зосереджена в регіонах із високим рівнем водного стресу [1-2], де навіть відносно помірна додаткова потреба підприємства у воді може набувати суттєвого значення через конкуренцію з іншими водокористувачами. Необхідно враховувати також і технологію виробництва, як вже описувалось у попередніх розділах, водоспоживання суттєво відрізняється для різних видів мінеральної сировини та способів її переробки [3].

Додатковим фактором є поступове зниження вмісту корисних компонентів у рудах окремих родовищ, тому що переробка бідніших руд потребує залучення більшого обсягу гірської маси для одержання тієї самої кількості кінцевого продукту, що може супроводжуватися збільшенням потреби у воді, енергії тощо. За даними International Energy Agency, середній вміст міді в рудах Чилі протягом останніх 15 років знизився приблизно на 30%, що слугувало одним з факторів збільшення ресурсомісткості її виробництва [4].

Основним напрямом зменшення кількісних ризиків є скорочення залежності підприємства від забору свіжої води, для цього застосовуються оборотні системи водопостачання, повторне та каскадне використання вод різної якості, очищення і повернення виробничих вод у технологічний цикл, а за відповідних умов вводяться альтернативні джерела водопостачання [3].

Для зменшення аварійних ризиків важливими є розділення чистих і потенційно забруднених вод, контроль поверхневого стоку промислових майданчиків, належне управління об'єктами накопичення відходів, очищення забруднених вод та систематичний моніторинг поверхневих і підземних вод. При цьому система управління має враховувати не лише нормальні умови експлуатації, а й можливі екстремальні ситуації (тривалі посухи, інтенсивні опади та повені тощо).

Отже, управління водними ризиками при освоєнні критичної мінеральної сировини доцільно розглядати як безперервний процес протягом усього життєвого циклу гірничо-видобувного об'єкту. Основною метою є не тільки мінімізація впливу підприємства на поверхневі та підземні води, а й забезпечення надійності самого виробництва в умовах змінної доступності водних ресурсів. Поєднання оцінки природних умов території, прогнозування потреб у воді, контролю її якості, повторного використання та моніторингу дозволяє зменшити як екологічні, так і виробничі ризики. Для критичної сировини це має особливе значення, оскільки збільшення видобутку необхідних ресурсів не повинно супроводжуватися непропорційним збільшенням навантаження на водні системи.

Контрольні запитання до розділу 10:

1. Що слід розуміти під водним ризиком при освоєнні родовищ критичної мінеральної сировини?

2. Які основні групи водних ризиків характерні для гірничодобувних і переробних підприємств?

3. Від яких природних, гідрогеологічних і технологічних факторів залежить рівень водного ризику?

4. Які заходи дозволяють зменшити кількісні, якісні та аварійні водні ризики протягом життєвого циклу гірничого підприємства?

Список рекомендованої літератури до розділу 10:

1. International Energy Agency. (2024). Global critical minerals outlook 2024. IEA.

2. Bredariol, T. de O. (2022, March 22). Reducing the impact of extractive industries on groundwater resources. International Energy Agency.

3. European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). Raw Materials Information System: Water.

4. International Energy Agency. (2025). Global critical minerals outlook 2025. IEA.

РОЗДІЛ 11. ЄВРОПЕЙСЬКІ ПРАКТИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ В УКРАЇНІ

У розділі розглянуто європейські підходи до управління водними ресурсами при освоєнні критичної мінеральної сировини та їх інтеграцію у дозвільні й природоохоронні процедури. Проаналізовано стан імплементації відповідних принципів в Україні та визначено перспективні напрями їх подальшого розвитку з урахуванням завдань освоєння критичної мінеральної сировини.

11.1. Європейські підходи до управління водними ресурсами при освоєнні мінеральної сировини

Європейський підхід до освоєння мінеральної сировини ґрунтується на поєднанні потреби у розвитку власної сировинної бази з необхідністю дотримання екологічних вимог, зокрема щодо охорони вод. При цьому стратегічне значення мінеральної сировини не є підставою для послаблення вимог щодо охорони вод та довкілля. Практично це означає, що водні аспекти мають враховуватися вже на ранніх етапах планування гірничо-видобувного проєкту, а не після початку його експлуатації. Проєкти видобувної промисловості входять до сфери застосування європейського законодавства про оцінку впливу на довкілля, а потенційний вплив на водне середовище є одним із компонентів такої оцінки [1].

Важливим є узгодження дозвільних процедур із вимогами Водної рамкової директиви ЄС, що безпосередньо пов’язано із розвитком критичної мінеральної сировини та має на меті зробити застосування вимог ВРД у дозвільних процедурах більш послідовним і передбачуваним [2].

Окремий напрям європейського регулювання стосується відходів видобувної промисловості. Директива 2006/21/ЕС встановлює вимоги щодо управління відходами, які утворюються під час розвідки, видобутку, переробки та зберігання мінеральних ресурсів, маючи на меті запобігання або максимальне

зменшення негативного впливу таких відходів на довкілля, зокрема на поверхневі й підземні води [3].

Важливо, що управління такими об'єктами не обмежується періодом експлуатації - сучасні вимоги передбачають заходи щодо запобігання забрудненню навколишнього середовища, контроль, планування закриття об'єктів і моніторинг після їх закриття. Такий підхід важливий для підземних вод, зміни стану яких можуть проявлятися поступово і зберігатися на довгий термін після завершення видобутку.

Ще одним важливим напрямом є перехід від реагування на вже сформовані наслідки до їх попередження та мінімізації, що було описано у попередньому розділі.

Для критичної мінеральної сировини важливим є також поєднання проєктного та басейнового рівнів управління, адже у такому контексті окремий гірничо-видобувний об'єкт розглядається не ізольовано, а з урахуванням стану водних об'єктів, на які він може впливати, існуючих водокористувачів та інших джерел навантаження. Це дозволяє враховувати кумулятивний вплив у районах концентрації видобувної та переробної діяльності. У рекомендаціях Європейської Комісії 2026 р. застосування вимог ВРД до дозвільних процедур прямо пов'язується із забезпеченням водної стійкості ЄС одночасно зі зменшенням залежності від імпорту критичної сировини [2].

Для України цей досвід має особливе значення в умовах розвитку власної ресурсної бази критичної мінеральної сировини та подальшого напрямку імплементації природоохоронного законодавства до вимог ЄС. Водночас значна частина принципів європейської водної політики вже інтегрована в українську систему управління водними ресурсами, і питання полягає не стільки в копіюванні європейської моделі, скільки у визначенні тих її елементів, які вже реалізовані в Україні, та напрямів, що потребують подальшого розвитку саме для гірничодобувного сектору.

11.2. Імплементація європейських підходів в Україні та перспективи розвитку

На сьогоднішній день, Україна вже реалізувала значну частину інституційних і нормативних змін, спрямованих на наближення системи управління водними ресурсами до європейської моделі. Якщо розглядати ці зміни в контексті освоєння критичної мінеральної сировини – то доцільно говорити не про створення (або копіювання) принципово нової системи, а про подальшу інтеграцію вимог ЄС у планування та реалізацію гірничих проєктів.

Одним із ключових результатів імплементації положень Водної рамкової директиви стало закріплення у Водному кодексі України басейнового принципу управління. Територія України поділена на дев'ять районів річкових басейнів (рис. 11.1), а плани управління річковими басейнами передбачають характеристику поверхневих і підземних вод, визначення основних антропогенних впливів, екологічних цілей, мереж моніторингу та комплексу заходів для їх досягнення [4].



Рисунок 11.1 – Райони річкових басейнів України. Джерело: Державне агентство водних ресурсів України [12].

Важливим практичним етапом стало затвердження першого циклу планів управління річковими басейнами на 2025-2030 рр., а саме – у 2024 р. Кабінет Міністрів України затвердив плани для Дніпра і Дону, Вісли, Дністра та Південного Бугу, а також інших районів річкових басейнів України [5-7]. Це показує, що басейнове планування вже можна вважати діючим інструментом української водної політики, а не лише перспективним напрямом її розвитку.

Українська система оцінки впливу планованої діяльності на довкілля також наближається до європейських підходів, адже із прийняттям у 2017 році Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» попередню систему державної екологічної експертизи було замінено процедурою ОВД, яка поширюється і на гірничо-видобувні проєкти та передбачає оцінку їх можливого впливу на водні ресурси, клімат та інші компоненти довкілля. Важливо, що законодавство вимагає враховувати не тільки прямий, а й опосередкований, кумулятивний, транскордонний, коротко- і довгостроковий впливи [8]. Саме це створює якісну нормативну основу для комплексної оцінки наслідків майбутніх проєктів з освоєння критичної мінеральної сировини для водних ресурсів.

Також функціонує система державного моніторингу вод, організована відповідно до Порядку здійснення державного моніторингу вод, що охоплює моніторинг поверхневих і підземних вод та є одним із першочергових інструментів інформаційного забезпечення басейнового управління [9].

Водночас окремі складові європейського регулювання гірничого сектору перебувають у процесі подальшої адаптації – продовжується робота над законодавством щодо управління відходами видобувної промисловості, спрямованим на імплементацію Директиви 2006/21/ЄС, питання адаптації цієї сфери до вимог ЄС залишається предметом законодавчої роботи і у 2026 р. [10].

Для України це особливо важливо через значні накопичені обсяги відходів гірничодобувної промисловості, що можуть розглядатися не тільки як джерело екологічного навантаження, а і як потенційне джерело критичної сировини. У затвердженій у травні 2026 р. Стратегії розвитку сфери критичних мінералів України на період до 2030 року передбачено, зокрема, оцінювання техногенних

родовищ, розвиток рециклінгу відходів видобувної промисловості та подальше наближення відповідного регулювання до Директиви 2006/21/ЄС [11].

Наступним етапом розвитку системи має стати логічне поєднання планування критичної мінеральної сировини з управлінням водними ресурсами, як це відбувається у ЄС. Наявність перспективного родовища та економічна доцільність його освоєння (особливо в старих видобувних регіонах) ще не означають, що територія має достатній водний ресурс для реалізації проєкту без істотного додаткового навантаження. Тому вже на ранніх стадіях важливо коректно оцінити потребу майбутнього підприємства у воді, водний баланс території, стан відповідних масивів поверхневих і підземних вод, потреби інших водокористувачів та прогнозовані зміни водозабезпеченості на всіх етапах роботи гірничо-видобувного підприємства.

Особливого значення це набуває для районів концентрації вже існуючої гірничовидобувної промисловості, де оцінка окремого підприємства повинна доповнюватись аналізом сукупного навантаження закритих, діючих і запланованих об’єктів. Такий підхід дозволяє пов’язати процедуру ОВД конкретного проєкту з цілями відповідного плану управління річкового басейну і оцінювати новий об’єкт не ізольовано, а в контексті вже сформованого водогосподарського навантаження.

Перспективним напрямом також є ширше застосування принципів збереження водного балансу протягом усього життєвого циклу родовища. При цьому має враховуватись не лише проєктне водоспоживання, але й сезонні та довгострокові зміни водних ресурсів, повторне використання вод, можливі зміни водопритоків (в залежності від глибини розробки), потреби у водовідведенні, а також гідродинамічні умови території після завершення видобутку. Для підземних вод особливо важливим залишається прогнозування змін рівневого режиму та якості вод після припинення експлуатації гірничого об’єкта.

В умовах наявних тенденцій кліматичних змін доцільним є використання сценарного підходу, коли водогосподарська система підприємства повинна оцінюватися не тільки для середніх багаторічних умов, а й для тривалих

маловодних періодів, посух, екстремальних опадів і паводків, з урахуванням географічного розташування родовища. Це дозволить розглядати водозабезпечення не як постійну характеристику усередненої території, а як параметр, що може істотно змінюватися протягом строку експлуатації родовища.

Отже, основним завданням для України є не автоматичне копіювання європейських норм, а послідовне поєднання вже створених інструментів, таких як басейнові плани управління, моніторинг вод, оцінка впливу на довкілля та регулювання гірничої діяльності, в єдину систему оцінки водних ризиків при освоєнні критичної мінеральної сировини. Розвиток власної сировинної бази має супроводжуватися раннім оцінюванням водозабезпеченості, врахуванням стану поверхневих і підземних вод, зважаючи саме на наші природні умови, сукупного навантаження в межах басейну та довгострокових наслідків гірничо-видобувної діяльності. Саме у такому випадку імплементація європейських підходів сприятиме не лише виконанню Україною євроінтеграційних зобов'язань, а й формуванню власної моделі відповідального освоєння критичної мінеральної сировини, у якій стратегічне значення мінеральних ресурсів буде поєднуватись із збереженням та раціональним використанням водних ресурсів і забезпеченням їх доступності для інших водокористувачів.

Контрольні запитання до розділу 11:

1. Які основні принципи характеризують європейський підхід до управління водними аспектами гірничо-видобувних проєктів?

2. Як вимоги Водної рамкової директиви ЄС враховуються під час планування та дозвільних процедур для гірничих проєктів?

3. Які елементи європейського басейнового управління водними ресурсами вже імплементовані в Україні?

4. Які напрями управління водними ресурсами потребують подальшого розвитку в Україні у зв'язку з освоєнням критичної мінеральної сировини?

5. Чому водні аспекти доцільно враховувати протягом усього життєвого циклу гірничого проєкту?

Список рекомендованої літератури до розділу 11:

1. European Parliament & Council of the European Union. (2011). Directive 2011/92/EU of the European Parliament and of the Council of 13 December 2011 on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment. Official Journal of the European Union, L 26, 1–21.

2. European Commission. (2026). Guidance for the implementation of the Water Framework Directive during the permitting of new projects and existing activities with a particular focus on the mining sector (Commission Notice C/2026/2836). Official Journal of the European Union.

3. European Parliament & Council of the European Union. (2006). Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC. Official Journal of the European Union, L 102, 15–34.

4. Верховна Рада України. (1995). Водний кодекс України від 06.06.1995 № 213/95-ВР (чинна редакція).

5. Кабінет Міністрів України. (2024). Про затвердження планів управління річковими басейнами Дніпра та Дону на 2025–2030 роки (Розпорядження від 01.11.2024 № 1077-р).

6. Кабінет Міністрів України. (2024). Про затвердження планів управління річковими басейнами Вісли, Дністра та Південного Бугу на 2025–2030 роки (Розпорядження від 01.11.2024 № 1078-р).

7. Кабінет Міністрів України. (2024). Про затвердження планів управління річковими басейнами річок Причорномор'я, Приазов'я та Криму на 2025–2030 роки (Розпорядження від 01.11.2024 № 1079-р).

8. Верховна Рада України. (2017). Про оцінку впливу на довкілля (Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII).

9. Кабінет Міністрів України. (2018). Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод (Постанова від 19.09.2018 № 758).

10. Верховна Рада України. (2024). Про управління відходами видобувної промисловості (Проєкт Закону України від 05.11.2024 № 12180).

11. Кабінет Міністрів України. (2026). Про схвалення Стратегії розвитку сфери критичних мінералів України на період до 2030 року (Розпорядження від 27.05.2026 № 569-р).

12. Водне господарство України. (2021). (1–2). https://mk-vodres.davr.gov.ua/sites/default/files/1-2__2021__VGU_E_.pdf

РОЗДІЛ 12. ПРАКТИЧНИЙ БЛОК

Завдання 1. Визначення кінцевої глибини розробки крутоспадного родовища критичної мінеральної сировини

Мета. Обґрунтувати доцільність фінансування проєкту з розробки родовища критичної мінеральної сировини.

Задачі: Визначити кінцеву (граничну) глибину ($H_к$, м) розробки крутоспадного залізорудного родовища, поклади якого містять критичну мінеральну сировину (германій) та термін експлуатації кар'єру (T_k, років):

Таблиця 12.1

Вихідні дані:

Варіант	$f_р$, тис. грн/т	$\gamma_к$, д.од	$C_{д.к}$, млн грн/т	β, град	b, грн/т	$m_г$, м	λ	$t_р$, грн/т	a, грн/т	$h_р$, м/рік	$\alpha_п$, град
1	69,0	0,007	10,0	40	50	50	0,8-0,9	22	55	4	50
2	54,3	0,005	11,0	35	55	60	0,8-0,9	15	50	4,2	55
3	71,2	0,006	12,0	33	60	70	0,8-0,9	25	55	4,5	60
4	51,2	0,004	13,0	32	52	80	0,8-0,9	18	53	5	52
5	75,2	0,008	9,5	30	45	90	0,8-0,9	31	52	3,8	57
6	71,2	0,009	8,0	40	62	100	0,8-0,9	26	43	5,5	51
7	66,4	0,01	6,8	35	59	55	0,8-0,9	20	45	5,8	62
8	66,0	0,011	6,1	33	53	65	0,8-0,9	30	50	6	54
9	76,6	0,012	6,5	32	58	75	0,8-0,9	35	61	6,2	58
10	64,4	0,013	5,0	30	50	85	0,8-0,9	17	50	6,5	56

Методика розрахунку:

1. Кінцева (гранична) глибина розробки крутоспадного родовища критичної мінеральної сировини (рис. 1):

$$H_к = \frac{K_{гр} \cdot m_г \cdot \lambda}{2ctg\beta}, \text{ м},$$

де: $K_{гр}$ – граничний (економічний) коефіцієнт розкриву; $m_г$ – горизонтальна потужність покладу корисної копалини, м; λ – коефіцієнт форми кар'єрного поля (0,8…0,9); β – кут укосу бортів кар'єру, град.

2. Граничний коефіцієнт розкриву, т/т:

$$K_{гр} = \frac{C - a}{b},$$

де: C – допустима собівартість корисної копалини, грн/т; a – середні витрати на виймання корисної копалини, грн/т; b – середні витрати на виймання порід розкриву, грн/т.

3. Допустима вартість корисної копалини

$$C = \gamma_к C_{д.к.} - (f_р + t_р), \text{ грн/т},$$

де $\gamma_к$ – вихід концентрату з 1 т видобутої корисної копалини, д.од; $C_{д.к.}$ – допустима собівартість концентрату германію, грн/т; $f_р$ – собівартість переробки 1 т германію на збагачувальній фабриці, грн/т; $t_р$ – витрати на транспортування 1 т корисної копалини від кар'єру до збагачувальної фабрики, грн/т.

4. Термін експлуатації кар'єру *Tk* (років):

$$T_k = \frac{1{,}1...1{,}2 V_{г.м}}{Q_{г.м}}.$$

5. Об'єм гірничої маси (за формулою В.В. Ржевського)

$$V_{г.м} = l_д \cdot m_г \cdot H_к + (l_д + m_г) \cdot H_k^2 \cdot \text{ctg}\beta + \frac{\pi}{3} \cdot H_k^3 \cdot \text{ctg}^2\beta.$$

де $l_д$ – довжина дна кар'єру, м. Приймаємо 1000…1200 м.

6. Річна продуктивність кар'єру по гірничій масі, м^3/рік

$$Q_{г.м} = Q_{к.к} + Q_{п.р}.$$

7. Річна продуктивність кар'єру по породам розкриву, м^3/рік

$$Q_{п.р} = Q_{к.к} \cdot K_{сер}.$$

8. Річна продуктивність кар'єру по корисній копалині, м^3/рік

$$Q_{к.к} = m_г \cdot h_р \cdot \lambda(H_к \text{ctg}\beta + l_д).$$

де $h_р$ – річний темп поглиблення гірничих робіт, м/рік.

9. Середній коефіцієнт розкриву, м^3/м^3:

$$K_{сер} = \frac{V_{г.м} - V_{к.к}}{V_{к.к}}.$$

10. Об’єм корисної копалини, м^3:

$$V_{к.к} = \lambda m_г (H_к - H_н)\, l_д$$

де $H_н$ – потужність наносів, 30…40 м.

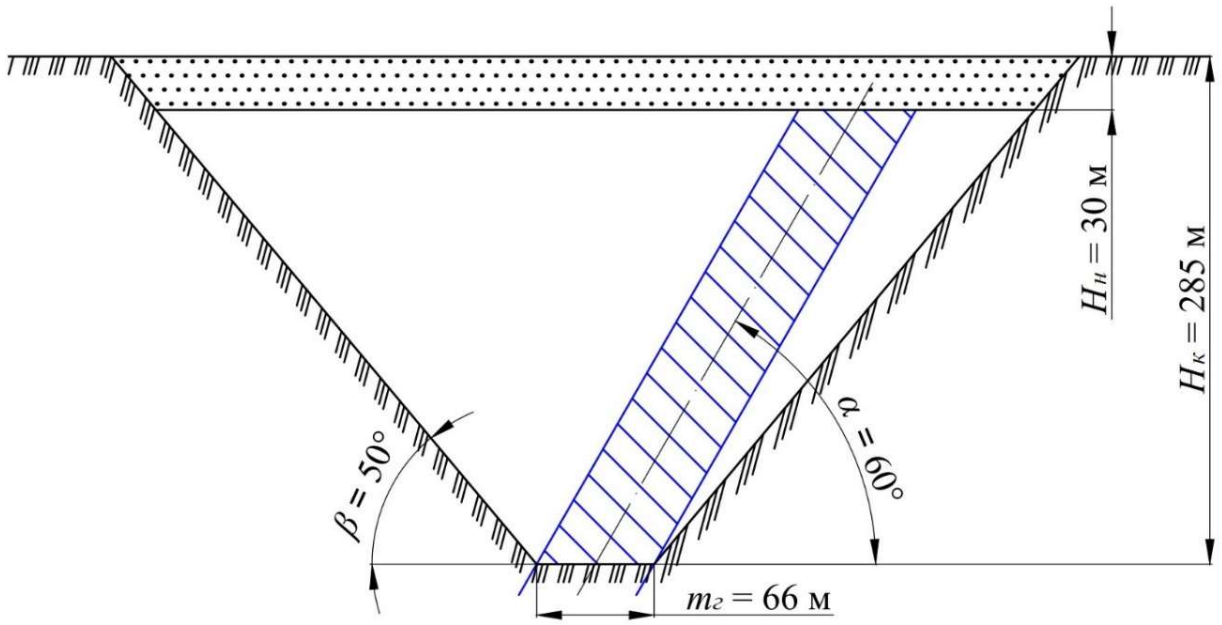


Рисунок 12.1. – Схема до визначення кінцевої глибини розробки

Висновок. При допустимій собівартості концентрату германію 10 млн грн/т , гранична глибина розробки крутоспадного залізорудного родовища дорівнює 285 м, а термін експлуатації кар’єру – 30 років. Підприємство приноситиме прибуток тривалий час за рахунок виготовлення дефіцитного товару. Доцільно розглянути до фінансування проєкт з розробки родовища критичної мінеральної сировини (германієвий концентрат).

Завдання 2. Визначення кількості літієвого концентрату, отриманого при переробці руд родовища сподумену-петаліту

Мета. Встановити кількість літієвого концентрату, отриманого при переробці руд родовища сподумену-петаліту.

Задачі: Графічно визначити **кінцеву (граничну) глибину** ($H_к$, м) розробки родовища сподумен-петаліту, поклади якого містять стратегічну мінеральну сировину (літій), відкритим способом. Обчислити **середній коефіцієнт розкриву** ($K_{сер}$, м^3/т) та **кількість літієвого концентрату** ($M_{конц.}$, т), отриманого при переробці руд родовища сподумену-петаліту.

Таблиця 12.2

Вихідні дані

№ свердловини						
1	2	3	4	5	6	7
Четвертинні поклади (глина, піски) – 30 м						
Скельні породи (біотити)						
220 м	50 м	70 м	60 м	30 м	40 м	220 м
	Руда (сподумен-петаліт)					
	50 м	30 м	20 м	40 м	10 м	
	Скельні породи (біотити)					
	120 м	50 м	60 м	70 м	170 м	
		Руда (сподумен-петаліт)				
		50 м	50 м	40 м		
		Скельні породи (біотити)				
		20 м	30 м	40 м		

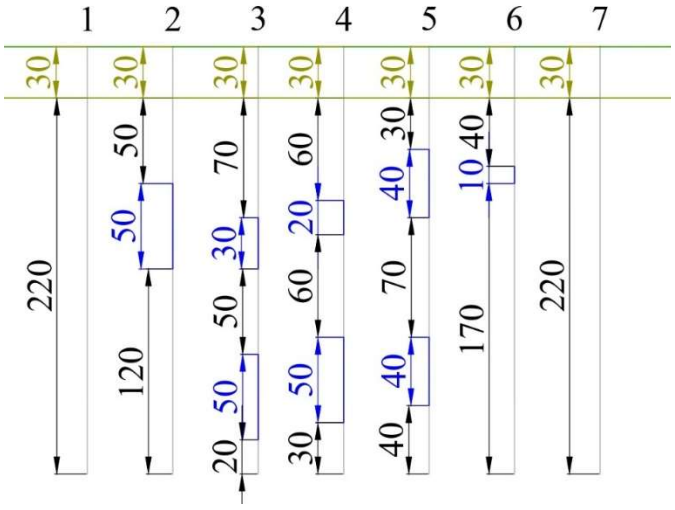


Рисунок 12.2. – Схема розташування семи розвідувальних свердловин (1–7):
коричневим позначено потужність четвертинних покладів, м;
синім – сподумен-петаліту (літієва руда), м; чорним – біотитів, м.
Відстань між свердловинами – 50 м

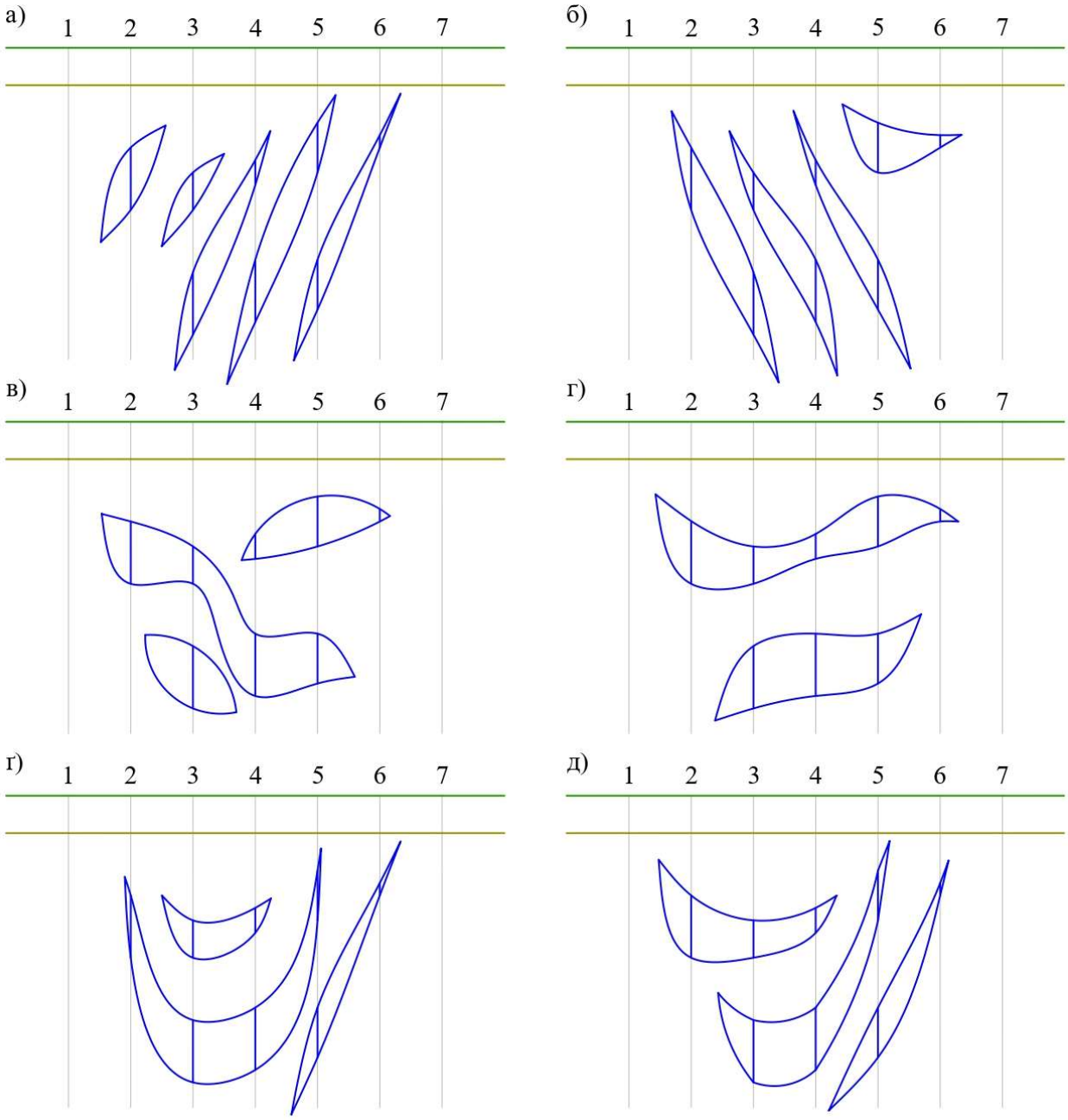


Рисунок 12.3. – Можливі варіанти (а–д) умов залягання родовища сподумен-петаліту за даними семи свердловин (1–7)

1. Графічно визначається кінцевий контур кар'єру (кути нахилу бортів β = 35–40 град), з якого вимірюємо ширину дна кар'єру ($b_д$, м) і **кінцеву (граничну) глибину** ($H_к$, м).

2. Графічно вимірюється площа перерізу рудного тіла $S_р$, м^2 за обраним варіантом умов його залягання (рис. 2), відповідно з даними розвідки (рис. 1).

3. Загальні запаси руди родовища сподумен-петаліту, т:

$$M_{к.к} = \rho \cdot S_р \cdot l_д,$$

де: ρ – об'ємна вага сподумен-петаліту, т/м^3 (3,0…3,2 т/м^3); $l_д$ – довжина дна кар'єру, м (600…700 м).

4. Об'єм гірничої маси:

$$V_{г.м} = l_д \cdot b_д \cdot H_к + (l_д + b_д) \cdot H_k^2 \cdot \text{ctg}\beta + \frac{\pi}{3} \cdot H_k^3 \cdot \text{ctg}^2\beta.$$

5. Середній коефіцієнт розкриву, м^3/т:

$$K_{сер} = \frac{V_{г.м} - S_р \cdot l_д}{M_{к.к}}.$$

6. Кількість літієвого концентрату, т

$$M_{конц} = M_{к.к} \cdot \gamma_к \cdot (1 - \gamma_в), \text{ т},$$

де: $\gamma_к$ – вихід концентрату, д.од (0,22…0,23), $\gamma_в$ – втрати концентрату при збагаченні, д.од. (0,03…0,06).

Завдання 3. Розрахунок терміну окупності капітальних витрат на розробку родовища титанових руд

Мета. Порівняти значення коефіцієнтів розкриву з витратами на розробку родовища за етапами та роками експлуатації кар'єру

Задачі: Розрахувати термін окупности ($T_о$, років) капітальних витрат на розробку родовищ титанових руд (ільменіт, рутил). Порівняти значення коефіцієнтів розкриву з витратами на розробку родовища за етапами (ч. I) та за роками (ч. II) експлуатації кар'єру.

Опис: Родовище титанових руд розробляється відкритим способом із суцільною системою розробки із постійною висотою робочої зони.

Корисна копалина розробляється екскаватором типу «пряма лопата» з навантаженням в автосамоскиди, нижній шар порід розкриву – екскаватором-***д***раглайном (безтранспортний спосіб), верхній – ***р***оторним екскаватором (транспортно-відвальний спосіб). Витрати на виймання порід розкриву умовно постійні на весь термін експлуатації кар'єру. Витрати на транспортування корисної копалини змінюються з часом зі збільшенням відстані транспортування.

Частина І. В масштабі 1:1000 (AutoCad), 1:2000 або 1:5000 накреслити схему розробки родовища титанових руд горизонтального залягання. Розділити її на **3** шари (*j*) і **10** етапів розробки (*i*).

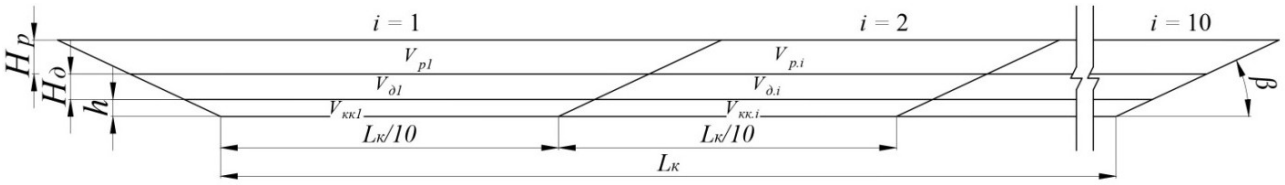


Рисунок 12.4. Модель розроблення родовища, поділена на горизонтальні шари (j = 3) та етапи (i = 10)

Таблиця 12.3

Вихідні дані до виконання завдання 3

№ в-ту	*h, м*	$H_р$, *м*	$H_д$, *м*	$b_д$, м	$L_к$, м	β, град	$Q_{кк.р}$, млн м^3/рік
1	8	30	15	1000	4000	35	1,0
2	10	25	14	1200	4200	36	1,1
3	9	20	13	1300	4400	37	1,3
4	8	24	12	1400	4600	38	1,5
5	9	29	15	1100	4800	39	1,6
6	10	27	14	1500	5000	40	1,8
7	8	28	12	1600	5200	34	1,9
8	10	22	13	1350	4900	39	2,1
9	8	21	15	1280	5100	37	2,3
10	9	26	11	1460	5500	36	2,5

Розрахувати об’єм порід розкриву, об’єм корисної копалини, коефіцієнт розкриву – середні і за етапами. Об’єми можуть бути розраховані як графічним методом (див. завдання 2), так і за формулами, наведеними нижче.

1. Об’єм корисної копалини в етапі 1, м^3:

$$V_{кк1} = (h(L_к/10) + h^2\text{ctg}\beta) \cdot (h\text{ctg}\beta + b_д)$$

2. Об’єм корисної копалини в наступних етапах (2–10), м^3:

$$V_{кк.i} = h(L_к/10) \cdot (h\text{ctg}\beta + b_д)$$

3. Об’єм порід розкриву в шарі $H_д$ в етапі 1, м^3:

$$V_{д1} = H_д((L_к/10) + 2\,h\text{ctg}(\beta) + H_д\text{ctg}(\beta)) \cdot (b_д + 2\,h\text{ctg}(\beta) + H_д\text{ctg}(\beta))$$

4. Об’єм порід розкриву в шарі $H_д$ наступних етапах (2–10), м^3:

$$V_{д.i} = H_д\,(L_к/10) \cdot (b_д + 2\,h\text{ctg}(\beta) + H_д\text{ctg}(\beta))$$

5. Об’єм порід розкриву в шарі $H_р$ в етапі 1, м^3:

$$V_{р1} = H_р((L_к/10) + 2\,h\text{ctg}(\beta) + 2H_д\text{ctg}(\beta) + H_р\text{ctg}(\beta)) \times$$

$$\times (b_д + 2h\text{ctg}(\beta) + 2H_д\text{ctg}(\beta) + H_р\text{ctg}(\beta))$$

6. Об’єм порід розкриву в шарі $H_р$ наступних етапах (2–10), м^3:

$$V_{р.i} = H_р\,(L_к/10) \cdot (b_д + 2h\text{ctg}(\beta) + 2H_д\text{ctg}(\beta) + H_р\text{ctg}(\beta))$$

7. Коефіцієнт розкриву (контурний) в етапі, м^3/м^3:

$$K_{рі} = (V_{д.i} + V_{р.i})/V_{кк.i}$$

Результати розрахунків представити у вигляді таблиць і графіків (Excel) за зразком, наведеним нижче

Таблиця 12.4

Результати розрахунку об’ємів порід розкриву і корисної копалини, коефіцієнту розкриву, відстані транспортування корисної копалини за етапами

Шари	Об’єм порід за етапами, м^3										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
$H_д$											
$H_р$											
h											
$H_д + H_р$											
Σ											
Контурний коефіцієнт розкриву за етапами, м^3/м^3											
$K_р$											
Відстань транспортування корисної копалини за етапами, км											
$l_{тр}$											

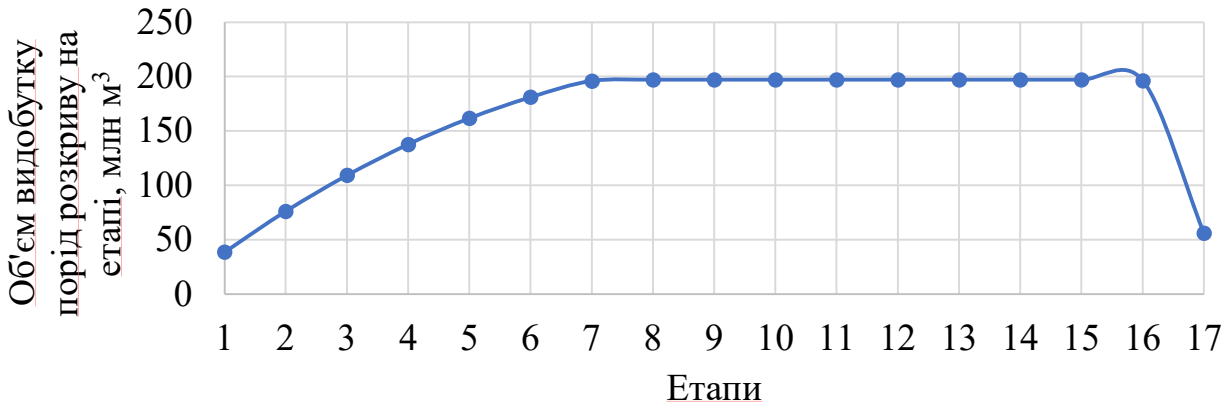


Рисунок 12.5. Розподіл об’єму порід розкриву за етапами розробки

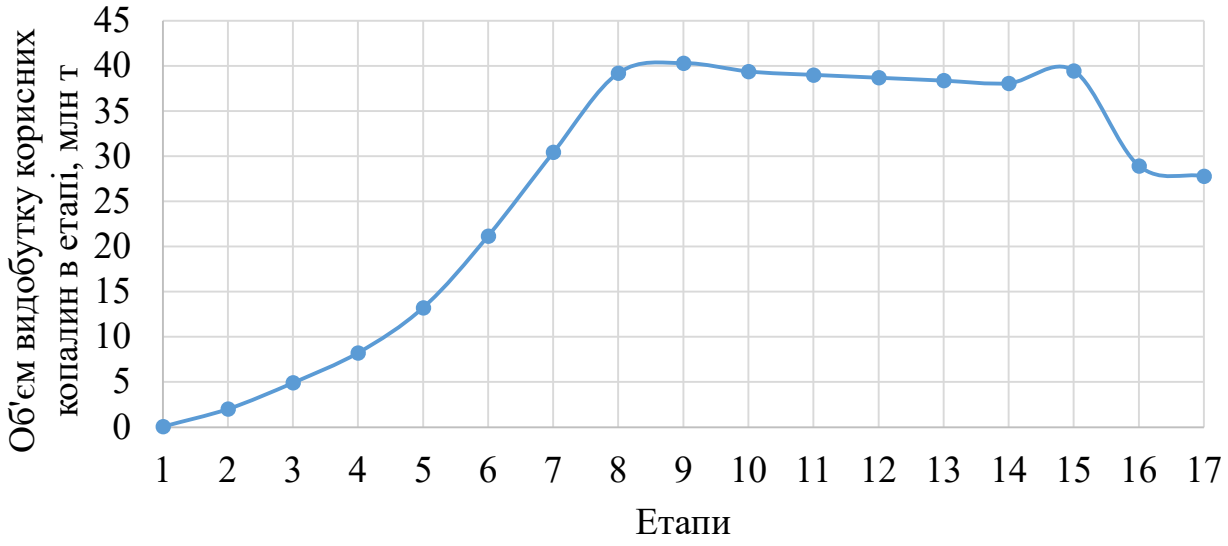


Рисунок 12.6. Розподіл об’єму корисної копалини за етапами розробки

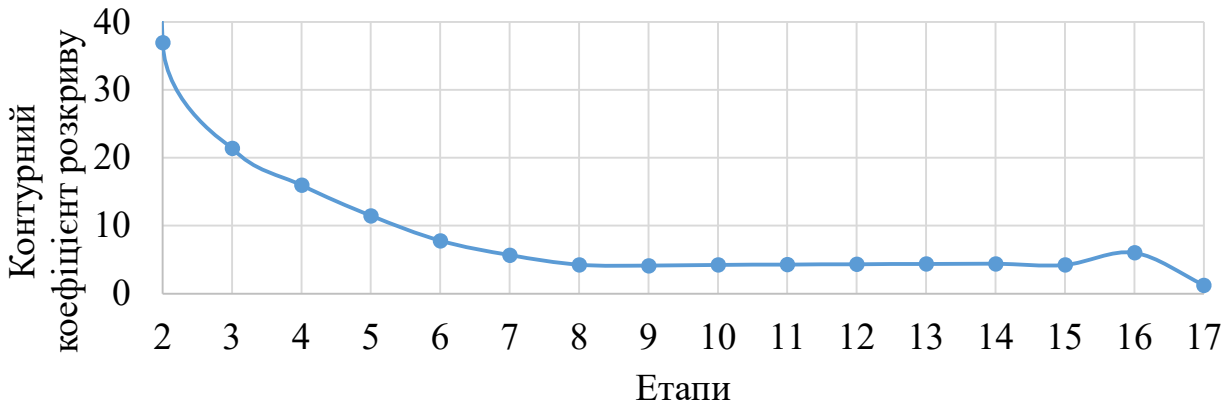


Рисунок 12.7. Контурний коефіцієнт розкриву в етапі розробки родовища

9. Розраховуємо відстань транспортування об'єму корисної копалини в *i*-му етапі в *j*-му горизонтальному шарі обчислити за формулою:

$$l_{mp.i.j} = \frac{1000 H_j K_{p.m.j}}{i_j} + \frac{1}{2} l_{i.j.e} + \sum_{1}^{i-1} l_{i.j.e}\text{, м,}$$

де: H_j – різниця висотних відміток поверхні та підошви *j*-го горизонтального шару, м (***у нас – глибина кар'єру***); $K_{p.m.j}$ – коефіцієнт розвитку траси для засобу транспорту, який діє в *j*-му горизонтальному шарі (1,1…1,2); i_j – керівний ухил траси засобу транспорту, який діє в *j*-му горизонтальному шарі, ‰ (70…80 ‰); $l_{i.j.e}$ – горизонтальна потужність *i*-го етапу в *j*-му горизонтальному шарі ($l_{i.j.e} = L_к/10$), м.

Частина ІІ. Визначити тривалість етапів розробки родовища критичної мінеральної сировини. Розрахувати об'єм видобутку порід розкриву, корисної копалини, коефіцієнт розкриву за роками.

10. Тривалість 1-го етапу, років:

$$T_{e1} = V_{кк1}/Q_{кк.р.}$$

11. Тривалість *i*-го етапу (етапи 2–10), років:

$$T_{ei} = V_{кк.i}/Q_{кк.р.}$$

12. Термін експлуатації кар'єру, років:

$$T_e = T_{e1} + 9T_{ei}$$

13. Об'єм порід розкриву в перший рік розробки родовища в шарі $H_д$, м^3:

$$V^t_{д1} = H_д \left(\left(\frac{Q_{кк.р}}{h b_д}\right) + 2\ h\text{ctg}(\beta) + H_д\text{ctg}(\beta)\right) \cdot \left(b_д + 2\ h\text{ctg}(\beta) + H_д\text{ctg}(\beta)\right)$$

14. Об'єм порід розкриву в шарі $H_д$ наступних роках (окрім останнього), м^3:

$$V^t_{д.i} = H_д \left(\frac{Q_{кк.р}}{h b_д}\right) \cdot \left(b_д + 2\ h\text{ctg}(\beta) + H_д\text{ctg}(\beta)\right)$$

15. Об'єм порід розкриву в перший рік розробки родовища в шарі $H_р$, м^3:

$$V^t_{p1} = H_p \left(\left(\frac{Q_{\text{кк.р}}}{h b_{\text{д}}}\right) + 2\,h\text{ctg}(\beta) + 2H_{\partial}\text{ctg}(\beta) + H_p\text{ctg}(\beta)\right) \times$$

$$\times \left(b_{\partial} + 2h\text{ctg}(\beta) + 2H_{\partial}\text{ctg}(\beta) + H_p\text{ctg}(\beta)\right)$$

16. Об’єм порід розкриву в шарі H_p наступних роках (окрім останнього), м^3:

$$V^t_{p.i} = H_p \left(\frac{Q_{\text{кк.р}}}{h b_{\text{д}}}\right) \cdot \left(b_{\partial} + 2h\text{ctg}(\beta) + 2H_{\partial}\text{ctg}(\beta) + H_p\text{ctg}(\beta)\right)$$

17. Коефіцієнт розкриву (поточний) за роками, м^3/м^3:

$$K_{t.i} = (V^t_{\partial.i} + V^t_{p.i}) \,/\, Q_{кк.р}$$

18. Відстань транспортування корисної копалини за роками, м:

$$l^t_{\text{тр}} = \frac{1000(h + H_{\text{р}} + H_{\text{д}})\text{К}_{\text{р.т}}}{70 \ldots 80} + \frac{Q_{\text{кк.р}}}{2hb_{\text{д}}} + \sum_{1}^{i-1} \frac{Q_{\text{кк.р}}}{hb_{\text{д}}}$$

19. Позаяк на останній рік припадатиме менша кількість об’єму порід розкриву/корисної копалини, розраховуємо його шляхом віднімання від загального об’єму порід за шарами об’єм, видобутий за попередні (повні роки).

Результати розрахунків представити у вигляді таблиць і графіків (Excel) за зразком, наведеним нижче

Таблиця 12.5

Результати розрахунку об’ємів порід розкриву і корисної копалини, коефіцієнту розкриву, відстані транспортування корисної копалини за роками

Шари	Об’єм порід за роками, м^3										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	…	Σ
H_{∂}											
H_p											
h											
$H_{\partial} + H_p$											
Σ											
Поточний коефіцієнт розкриву за етапами, м^3/м^3											
K_p											
Відстань транспортування корисної копалини за роками, км											
l^t_{mp}											

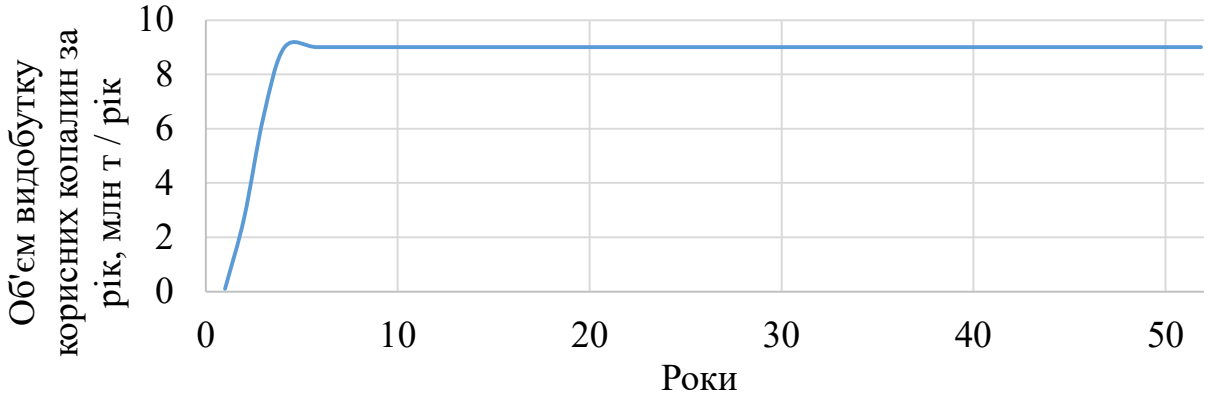


Рисунок 12.8. Продуктивність кар’єру з видобутку корисної копалини за роками

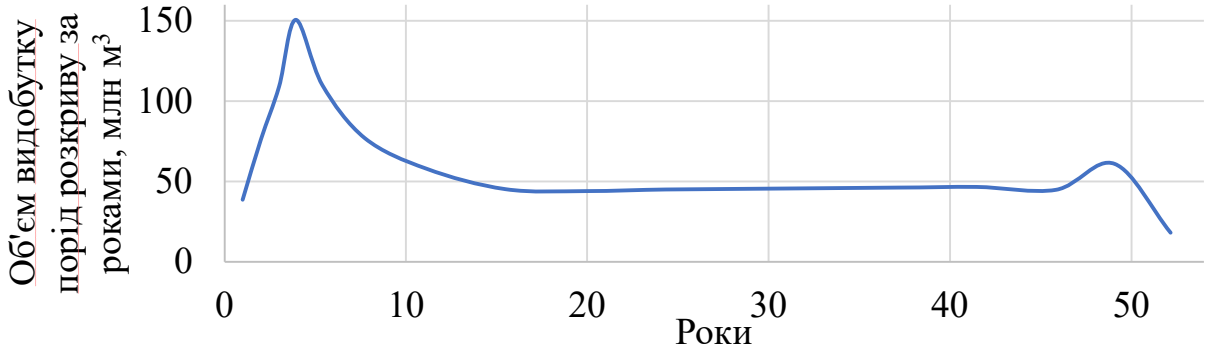


Рисунок 12.9. Продуктивність кар’єру з вилучення порід розкриву за роками

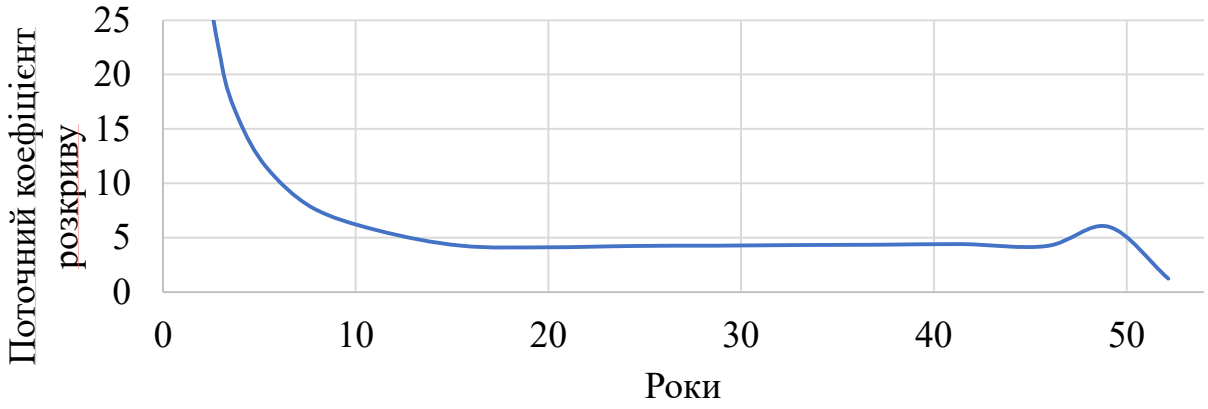


Рисунок 12.10. Динаміка зміни поточного коефіцієнту розкриву за роками

Частина ІІІ. Визначити витрати на розробку родовища за етапами та роками. Розрахувати собівартість корисної копалини за етапами і роками. Розрахувати **термін окупности (T_o, років)** капітальних витрат на розробку родовища титанових руд (ільменіт, рутил).

20. Розраховуються витрати на гірничі роботи в етапі та за роками за формулами:

$$C_{V_{p.i.j}} = V_{p.i.j}\left(C_m l_{mp.i.j} + C_\partial\right) = V_{p.i.j} * C_{роз.}$$

$$C_{P_{K.i.j}} = P_{K.i.j}\left(C_m l_{mp.i.j} + C_\partial\right),$$

$$C_{KK.i.j} = \frac{C_{V_{p.i.j}} + C_{P_{K.i.j}}}{P_{K.i.j}},$$

де: $C_{V_{p.i.j}}$ – витрати на вилучення порід розкриву в *i*-му етапі в *j*-му горизонтальному шарі, грн; $V_{p.i.j}$ – кількість порід розкриву в *i*-му етапі в *j*-му горизонтальному шарі, т; $C_{P_{K.i.j}}$ – витрати на видобування корисної копалини в *i*-му етапі в *j*-му горизонтальному шарі, грн; $P_{K.i.j}$ – кількість корисної копалини в *i*-му етапі в *j*-му горизонтальному шарі, т; $C_{KK.i.j}$ – собівартість видобування 1 т корисної копалини в *i*-му етапі в *j*-му горизонтальному шарі, грн/т; C_{mp} – собівартість перевезення гірничої маси, грн/т·км; $l_{mp.i.j}$ – відстань транспортування гірничої маси в *i*-му етапі в *j*-му горизонтальному шарі, км; C_∂ – собівартість всіх процесів, окрім транспортування, грн/т.

Таблиця 12.6

Вихідні дані до третьої частини завдання 3

№ в-ту	$C_{тр}$, грн/т·км	$C_е$, грн	$C_{розк}$, грн	$К$, млрд грн	$Ц$, грн/м^3
1	7,2	50	18	2,0	476
2	8,5	52	22	2,1	371
3	9,1	54	24	1,9	364
4	7,5	48	19	1,8	337
5	5,6	46	20	2,2	418
6	6,9	42	25	2,4	322
7	8,8	58	21	2,8	418
8	6,6	60	30	2,7	411
9	7,3	62	28	2,3	434
10	8,0	63	26	2,6	383

Результати розрахунків подаються у вигляді таблиць 12.7, 12.8 (Excel)

Таблиця 12.7

Результати вартости видобутку об'ємів порід розкриву і корисної копалини, коефіцієнту розкриву, відстані транспортування корисної копалини, собівартости видобутку 1 м^3 **за етапами**

Шари	Витрати на видобування за етапами, грн/м^3										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
$H_д$											
$H_р$											
h											
$H_д + H_р$											
Σ											
Поточний коефіцієнт розкриву за етапами, м^3/м^3											
$K_р$											
Відстань транспортування корисної копалини за етапами, км											
$l_{тр}$											
Собівартість видобутку корисної копалини 1 м^3 за етапами, грн/м^3											
$C_{кк}$											

Таблиця 12.8

Результати розрахунку об'ємів порід розкриву і корисної копалини, коефіцієнту розкриву, відстані транспортування корисної копалини, собівартости видобутку 1 м^3 **за роками**

Шари	Витрати на видобування за роками, грн/м^3										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	…	Σ
$H_д$											
$H_р$											
h											
$H_д + H_р$											
Σ											
Поточний коефіцієнт розкриву за роками, м^3/м^3											
$K_р$											
Відстань транспортування корисної копалини за роками, км											
$l^t_{тр}$											
Собівартість видобутку корисної копалини 1 м^3 за роками, грн/м^3											
$C_{кк}$											

$$Скк= C_{v.кк}+C_{vр.заг} + C_{vд.заг} /Q_{кк.р.}$$

Витрати на виготовлення продукції.

Об'єми видобутку порід розкриву ($V_р$ і $V_д$) в кожній клітині в таблиці множимо на витрати на вилучення порід розкриву ($C_{розк.}$), а об'єм корисної копалини ($V_{кк}$) на витрати на вилучення корисної копалини ($C_е$) плюс добуток відстані транспортування і витрат на транспортування ($l_{тр} \cdot C_{тр}$).

$$C_{vр.заг}= V_р\ C_{розк}=$$

$$C_{vд.заг}= V_д\ C_{розк}=$$

$$C_{v.кк}=V_{кк}\ (C_е+ l_{тр} \cdot C_{тр})=$$

Далі сумарні витрати за етапами (роками) ділимо на кількість корисної копалини в етапі або продуктивність кар'єру за корисною копалиною відповідно.

21. Термін окупности капітальних витрат на промислове виробництво розраховується за формулою:

$$T_о = К/П,$$

де: $К$ – капітальні витрати (інвестиційні вкладення) на створення об'єкта, грн;
$П$ – прибуток, отриманий від реалізації готової продукції, грн/рік.

22. Прибуток визначається за формулою:

$$П = B_Р – С, \text{ грн/рік},$$

де $B_Р$ – виручка від реалізації готової продукції, грн/рік ($B_Р = Ц \cdot Q_{кк.р}$); $С$ – витрати на виготовлення продукції, грн/рік (**див. вище** Σ за рік табл. 12.8).

Так як специфіка гірничовидобувного підприємства полягає в мінливості об'ємів виробництва та вартості продукції, термін окупності капітальних витрат на будівництво кар'єру має бути розрахований шляхом порівняння кумулятивної функції накопичення прибутку від реалізації корисної копалини зі значенням капітальних витрат (рис. 12.11).

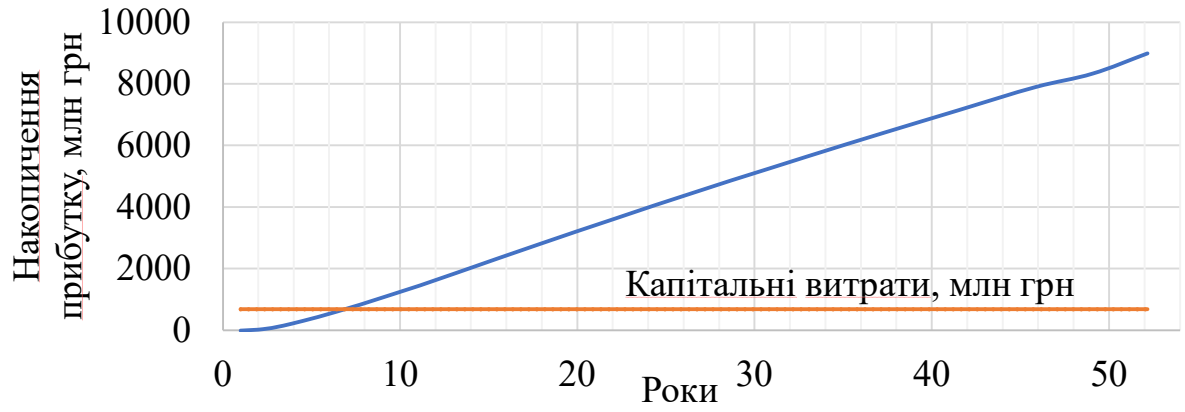


Рисунок 12.11. Кумулятивний графік функції накопичення прибутку

Для цього будуємо таблицю 12.9

Таблиця 12.9

До визначення терміну окупности капітальних інвестицій

	Витрати на видобування за роками, м^3										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	…	Σ
Капітальні витрати, *К*, грн											
Накопичення прибутку, грн											

Завдання 4. Визначення основних параметрів кар'єру родовища мідно-порфірових руд графічним та аналітичним методами

Мета. Встановити параметри кар'єру з розробки родовища мідно-порфірових руд графічним та аналітичним методами

Задачі: Визначити основні параметри кар'єру родовища мідно-порфірових руд графічним (частина I) та аналітичним методами (частина II). Вихідні дані наведено у табл. 12.10.

Частина I (графічний метод). У масштабі відкладається рівень денної поверхні, потужність наносів та контури покладу мідно-порфірових руд майбутнього кар'єру. Відрізок з точки **А** величиною $M_{max}=M_г\,K_{гр}$ відкладається в будь-яку сторону на денній поверхні родовища. Із кінців відрізка назустріч один

одному проводять лінії неробочих бортів γ_{max}. Далі точку перетину ліній бортів кар'єру **Б** переносять по горизонталі в середину рудного покладу. Відстань від цієї точки до земної поверхні і є максимальна глибина кар'єру (рис. 12.12).

Таблиця 12.10

Вихідні дані до виконання завдання 4

№ в-ту	$K_{гр}$, м^3/м^3	γ_{max}, град.	$M_г$, м	$\alpha_п$, град.	$H_н$, м	М, м	П,м	$\beta_{раб}$, град
1	15	55	68	60	30	1000	4600	20
2	16	47	95	65	31	900	4500	21
3	17	42	87	70	32	850	4200	22
4	18	51	67	75	33	1100	5000	23
5	15	48	59	63	34	950	4900	24
6	16	44	75	71	35	1050	4800	25
7	17	53	78	62	36	975	4700	26
8	18	45	69	64	37	875	4400	27
9	15	51	85	72	38	1075	4950	19
10	16	54	100	74	39	920	4350	20

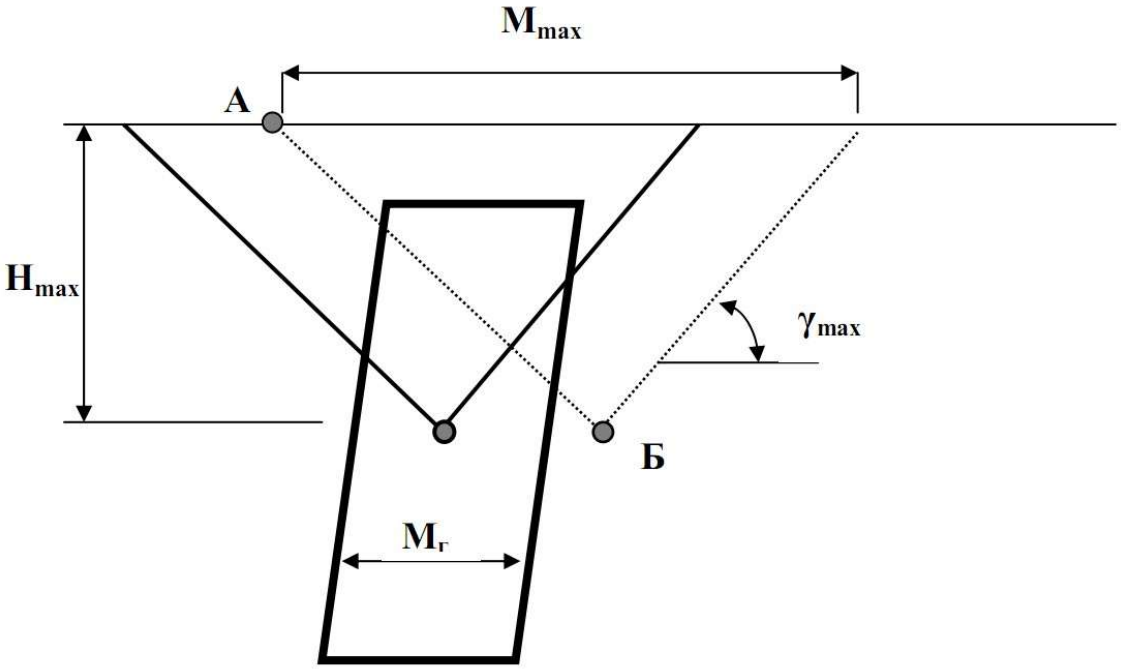


Рисунок 12.12. Схема щодо визначення кінцевої глибини кар'єру

Частина ІІ (аналітичний метод).

1. Визначення кінцевої глибини кар'єру. Для пластоподібних похилих і крутих покладів

$$\text{Н}_{max} = 0{,}5 \cdot M_{max} \cdot tg\gamma_{max}, \text{м}$$

$$M_{max}=M_г\, K_{гр}, \text{ м}$$

2. Об'єм гірничої маси у встановлених контурах кар'єру (рис. 12.13).

$$V_{\text{гм}} = 0{,}25 \cdot \text{М}^2 \cdot tg\gamma_{max} \cdot \left(\pi \cdot \frac{\text{М}}{6} + \text{П}\right), \text{м}^3$$

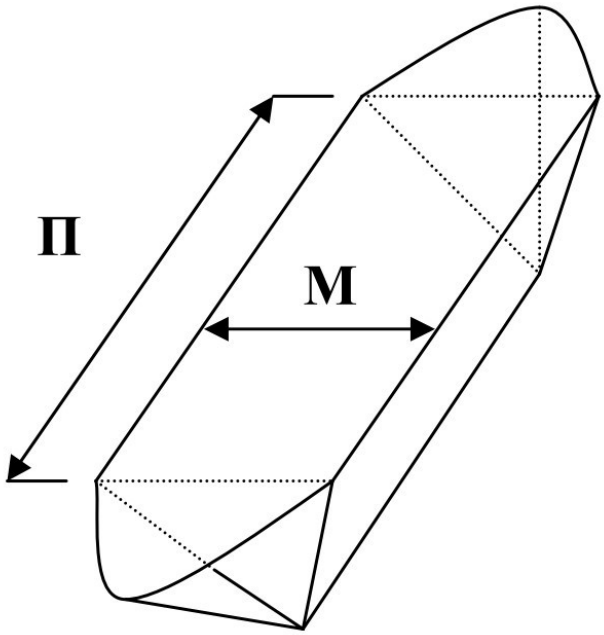


Рисунок 12.13. Схема до визначення об'ємів гірничої маси

3. Об'єм корисної копалини у встановлених контурах кар'єру.

$$V_{\text{кк}} = \text{М}_\text{г} \cdot \text{П} \cdot (\text{Н}_{max} - \text{Н}_\text{н}) - 0{,}25 \cdot \text{М}_\text{г}^2 \cdot \text{П} \cdot tg\gamma_{max}, \text{м}^3$$

Промислові запаси корисної копалини

$$\text{З}_{\text{кк}} = V_{\text{кк}} \cdot \gamma \cdot k_\text{в}, \text{ т}$$

де γ – щільність мідно-порфірової руди, (4,5…5,5) т/м^3; $k_\text{в}$ – коефіцієнт вилучення руди із надр (0,95…0,98).

4. Продуктивність кар'єру по руді в конкретних гірничо-геологічних умовах.

$$A_{max}=\upsilon_г \cdot S_р \cdot k_в \ (1+r) \ \gamma, \text{ т}$$

де $\upsilon_г$ – швидкість поглиблення гірничих робіт, м/рік (10…12), $S_р$ – площа корисної копалини у плані, ($S_р = M_г \cdot П$), r – коефіцієнт розубожіння (0,1…0,2).

5. Розрахункова продуктивність кар'єру по корисній копалині повинна відповідати наступному виразу:

$$Т = \frac{З_{кк}}{А} \geq Т_{min}$$

A, млн.т/рік	<1	1…2	2…5	5…10	10…20	20…30
T_{min}, роки	10	10…15	15…20	20…25	25…40	40…50

6. Глибина кар'єру в довільний момент часу:

$$h_п = t_п \cdot \upsilon_г$$

$h_п$ розраховуємо на 5, 10 та 15 роки експлуатації кар'єру.

7. Рознос бортів кар'єру на земній поверхні у довільний момент часу:

$$M_{попер}=2 \cdot t_п \ \upsilon_г \ ctg\beta_{раб}$$

8. Глибина кар'єру при досягненні максимального розносу бортів по поверхні:

$$h_н = 0{,}5 \ M_{max} \ tg\beta_{раб}$$

9. Термін експлуатації кар'єру при досягненні цієї глибини:

$$t_н = h_н / \upsilon_г$$

*Побудувати графік залежності глибини кар'єру від терміну його експлуатації в довільний момент часу на основі формули п. 6.

ТЕСТОВИЙ КОНТРОЛЬ ЗНАНЬ

1. Мінеральна сировина, яка має конкретне, специфічне застосування у високотехнологічних та стратегічних галузях і для якої на сучасному рівні розвитку технологій не існує заміни, а в її постачанні домінує один або кілька виробників це:

а) критична мінеральна сировина;

б) важлива мінеральна сировина;

в) дорогоцінна сировина;

г) будь-яка сировина на світовому ринку.

2. Відповідно до рішення Ради національної безпеки і оборони України № 306/2021 стратегічне значення мають:

а) металічні та неметалічні корисні копалини;

б) усі корисні копалини;

в) лише дорогоцінні метали;

г) метали, що імпортуються з закордону.

3. У чому полягають ризики постачання критичної сировини для виготовлення літій-іонних акумуляторів в ЄС?

а) залежність від Китаю з Африкою та Латинською Америкою, які забезпечують до 74 % усієї сировини;

б) ризики відсутні;

в) низька потреба у використанні даних технологій;

г) надмірне виготовлення в ЄС критичної сировини для виготовлення літій-іонних акумуляторів.

4. Технології паливних елементів (fuel cells) передбачають:

а) виготовлення водню з використанням електроенергії;

б) використання акумуляторів для електричних автівок;

в) використання вугілля для отримання електроенергії;

г) застосування сонячних електростанцій для виробництва електроенергії.

5. Який критичний матеріал не використовується при виготовленні вітрогенераторів:

а) германій;

б) ніобій;

в) алюміній;

г) диспрозій.

6. Основне призначення тягових двигунів у сучасних технологіях:

а) виготовлення електричних і гібридних автівок;

б) виготовлення сонячних електростанцій;

в) виробництво паливних елементів;

г) використовуються в усіх технологіях.

7. В чому полягають ризики для ЄС при виготовленні фотоелектриків (сонячних електростанцій)?

а) залежність ЄС на 64% від імпорту металевого кремнію;

б) ризики відсутні;

в) зниження потреби населення у сонячних електростанціях;

г) відсутність в ЄС усіх критичних мінералів, необхідних для виготовлення фотоелектриків.

8. Чим обумовлені перспективи розвитку робототехніки?

а) прогнозованим зростанням ринку робототехніки з 3 до 28 млн одиниць роботів до 2040 року;

б) перспективи розвитку відсутні;

в) зростанням ринку роботів до 300 млн одиниць до 2030 року;

г) високі витрати на обслуговування роботів призводять до нерентабельності їх використання.

9. В яких деталях безпілотних літальних апаратів (дронах) використовуються рідкісноземельні елементи?

а) в електродвигунах з електронним контролем швидкості;

б) в усіх запчастинах;

в) при виготовлені корпусів;

г) взагалі не використовуються.

10. У чому полягають переваги адитивного виробництва (3-D друк):

а) можливість заміни стаціонарного місця виготовлення традиційних компонентів;

б) переваги відсутні;

в) попит на технології адитивного виробництва знижується;

г) можливість виготовлення будь-яких виробів.

11. В яких компонентах використовується кремній при виготовленні цифрових технологій:

а) для електроніки в напівпровідниках, SSD та мікроелектроніці;

б) в усіх деталях;

в) взагалі не використовується;

г) при виготовленні скла для волоконно-оптичних кабелів.

12. Які галузі економіки відносяться до стратегічних у Європейському Союзі:

а) усі відповіді вірні;

б) відновлювальна енергетика;

в) електромобільність;

г) оборонна промисловість.

13. Від імпорту якої критичної сировини залежить галузь відновлювальної енергетики ЄС?

а) REE, магнію, ніобію, германію, боратів, скандію та ін.;

б) від усіх корисних копалин;

в) дана галузь є незалежною від імпорту критичної сировини;

г) лише від імпорту дорогоцінних металів.

14. Яка технологія не є критичною при виготовленні електромобілів?

а) відновлювальна енергетика;

б) літій-іонні акумулятори;

в) тягові двигуни;

г) інформаційні технології.

15. Який основний виклик постає перед оборонною промисловістю ЄС у питаннях забезпечення критичною сировиною?

а) Китай є головним світовим виробником 58% сировини, яка вважається важливою для оборонного застосування;

б) оборонна промисловість ЄС повністю забезпечена власною сировиною;

в) розвиток даної промисловості не має стратегічного пріоритету;

г) оборонна промисловість не використовує критичну мінеральну сировину.

16. З яких руд отримують алюміній?

а) бокситові руди;

б) будь-які руди;

в) марганцеві руди;

г) алюміній зустрічається у природі вже у вигляді металу.

17. Знайдіть зайвий метал, що не належить до рідкісноземельних:

а) кобальт;

б) ітрій;

в) неодим;

г) лантан.

18. Який метал не входить до платинової групи?

а) гафній;

б) іридій;

в) платина;

г) родій.

19. З яких руд отримують сурму (стибій), що відноситься до металоїдів?

а) стибієвих, ртутно-стибієвих і золото-стибієвих руд;

б) знаходиться у природі у чистому вигляді;

в) сурма не видобувається, оскільки має низький попит;

г) усі відповіді вірні.

20. Знайдіть одне з можливих застосувань бариту у промисловості:

а) поглинач радіоактивного випромінювання;

б) виробництво металевої продукції;

в) виробництво скла;

г) застосовується в усіх галузях промисловості.

21. Яка роль урядів у сфері управління водними ресурсами в гірничодобувному секторі згідно з міжнародними рамковими документами?

а) лише збір статистичних даних про водокористування

б) контроль лише якості питної води

г) нагляд за видобутком, використанням, скиданням і якістю вод на рівні об’єктів і басейнів

в) передача всіх повноважень приватним компаніям

22. Який принцип є спільним для більшості сучасних міжнародних систем моніторингу вод у гірничій галузі?

а) проведення моніторингу лише після початку видобутку

б) орієнтація виключно на хімічні показники води

в) ризик-орієнтований підхід до організації моніторингу

23. Який підхід лежить в основі управління водними ресурсами в Європейському Союзі відповідно до Водної рамкової директиви?

а) адміністративний принцип

б) галузевий принцип за видами водокористування

в) басейновий принцип управління водними ресурсами

24. Що є ключовими причинами загострення водної кризи?

а) лише зростання населення і урбанізація

б) лише техногенне навантаження від промисловості

в) кліматичні зміни, зростання споживання, деградація водних екосистем та техногенне навантаження

г) виключно нестача підземних вод у світі

25. Яке твердження найточніше описує підхід «м'якого шляху» в управлінні водними ресурсами?

а) поєднання водозбереження, децентралізованих технологій та інтегрованого управління з урахуванням потреб людей і екосистем

б) відмова від урахування потреб екосистем, фокус лише на водопостачанні населення

в) застосування лише адміністративних обмежень водокористування без технологічних змін

26. Який з перелічених секторів є одним з найбільших споживачів води в Україні?

а) туризм

б) лісове господарство

в) промисловість

г) побутове водоспоживання

27. Яка основна мета управління відходами у сфері критичної сировини?

а) лише зменшення кількості звітності

б) тимчасове зберігання відходів на полігонах

в) повна заборона утворення відходів

г) зменшення екологічного впливу та повторне використання цінних компонентів

28. Який принцип лежить в основі сучасної політики управління відходами критичної сировини?

а) циркулярна економіка та ресурсоефективність

б) максимальне захоронення

в) ліквідація відходів без жодного сортування

г) використання лише первинних ресурсів

29. Яка стадія є ключовою для перетворення відходів на вторинні ресурси?

а) транспортування

б) переробка та вилучення корисних компонентів

в) захоронення

г) накопичення

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

- Адитивні технології (3D-друк) – 3, 26, 30, 34, 40
- Акумуляторні метали – 9
- Алюміній (боксит) – 4, 21, 24, 35, 89
- Арсен (миш'як) – 4, 5, 20, 21, 24, 186
- Аерокосмічна галузь – 26, 29, 30

Б

- Барит – 4, 20, 24, 130
- Басейновий принцип управління – 6, 232, 236, 239, 243
- Батареї (акумулятори) – 3, 9, 22, 23, 26, 27, 33, 35, 43
- Безпілотні літальні апарати (БПЛА, дрони) – 3, 26, 29, 34, 40
- Берилій – 4, 20, 21, 24, 36, 38, 132
- Вісмут – 4, 20, 21, 24, 89, 94
- Бор (борат) – 4, 5, 24, 33, 180

В

- Ванадій – 4, 20, 21, 24, 35, 96
- Важкі рідкісноземельні елементи (HREE) – 4, 5, 8, 11, 24, 26, 145
- Вітрогенератори (вітроенергетика) – 3, 26, 27, 28, 33
- Вода (водні ресурси) – 5, 6, 16, 211
- Водна рамкова директива (ВРД) ЄС – 6, 12, 222, 224
- Водні ризики – 6, 246
- Вольфрам – 4, 20, 21, 24, 35, 97
- Вторинна сировина (Urban Mining) – 10, 22

Г

- Галій – 4, 20, 21, 24, 35, 89, 92
- Гафній – 4, 20, 21, 24, 35, 96, 99
- Гелій – 4, 5, 24, 197
- Геолого-економічна оцінка (ГЕО) – 9, 11
- Геополітична монополія – 10, 32, 40
- Германій – 4, 5, 20, 21, 24, 26, 35, 179, 184
- Гірничо-видобувний сектор – 6, 13, 18, 222
- Глобальний ланцюг доданої вартості – 9, 18
- Графіт (природний) – 4, 5, 9, 14, 20, 24, 36, 37, 43, 194

Д

- Декарбонізація (енергетичний перехід) – 8, 11, 26, 27, 42
- Держгеонадра – 12
- Державна комісія по запасах (ДКЗ) – 12
- Диверсифікація постачання – 8, 10, 18, 23
- Дрони (БПЛА) – 3, 26, 29, 34, 40

Е

- Екологічна безпека – 2, 13, 16
- Екологічний, соціальний та корпоративний менеджмент (ESG) – 10
- Економічна важливість (Economic Importance) – 8, 14, 19
- Експортні квоти – 10
- Електромобілі – 9, 14, 28, 34
- Енергетичний перехід – 8, 11, 18, 26, 42

З

- Заваллівське родовище графіту – 37
- Законодавча база ЄС – 3, 18, 22
- Закон ЄС про критичну сировину (CRMA) – 8, 11, 23, 24, 38
- Заміщення (субституція) – 42

- Зелена угода (European Green Deal) – 13, 18

I

- Ільменітовий концентрат – 37
- Імпортна залежність – 22, 35, 40
- Індій – 20, 21, 35
- Індустрія 4.0 – 13, 29
- Інвестиції – 36, 38
- Іридій – 4, 9, 119
- Ітрій – 8, 20, 21

К

- Калійна сіль – 14, 20, 21
- Каолін – 14
- Каталізатори – 9, 33
- Кліматична нейтральність – 14, 18
- Кобальт – 4, 9, 14, 24, 35, 36, 40, 96, 102
- Кодекс JORC – 9, 12
- Коксівне вугілля – 5, 6, 24, 207
- Космічні програми – 14, 26, 28
- Кремній (металевий) – 4, 5, 24, 34, 35, 43, 179, 182
- Критична мінеральна сировина (КМС) – 2, 3, 8, 11, 19, 21, 38
- Критичні технології – 3, 14, 18, 26, 38

Л

- Лантаноїди – 4, 5, 8, 20, 21, 24, 145
- Ланцюг доданої вартості – 9, 18, 38
- Легкі рідкісноземельні елементи (LREE) – 4, 5, 8, 11, 24, 26, 145
- Літій (літієві руди) – 4, 9, 14, 21, 23, 24, 36, 37, 130, 134
- Літій-іонні акумулятори – 3, 9, 26, 27, 33, 35, 40, 43

М

- Магній – 4, 20, 24, 26, 35, 130, 137
- Марганець (марганцева руда) – 4, 9, 14, 20, 24, 96, 104
- Матриця технологій – 26
- Мідь (мідні руди) – 4, 20, 21, 24, 35, 43, 96, 107
- Мікросхеми (напівпровідники) – 19, 30, 35
- Мінерально-сировинна база (МСБ) – 2, 9, 11, 14, 18, 38
- Моніторинг вод – 6, 229

Н

- Навколишнє середовище (довкілля) – 2, 13, 15, 16, 18
- Напівпровідники – 30
- Надрокористування – 14, 17, 18
- Національна безпека – 8, 18, 19
- Неодимові магніти – 9
- Неметали – 4, 5, 24, 193, 194
- Нікель – 4, 9, 14, 20, 21, 24, 35, 36, 38, 96, 109
- Ніобій – 4, 20, 21, 24, 26, 35, 36, 38, 96, 111

О

- Олово (олов'яні руди) – 20, 21
- Осмій – 4, 9, 119, 125
- Очисні споруди / рафінування – 9, 10, 40, 42
- Оцінка запасів (класифікація) – 2, 9, 11, 21

П

- Паладій – 4, 9, 11, 119, 121
- Паливні елементи – 3, 9, 26, 27, 33, 40, 47
- Періодична система елементів – 4, 24, 35
- Пержанське родовище берилію – 38
- Перспективні ресурси – 9, 11
- Плавина (флюс) – 3
- Платина – 4, 9, 11, 119, 123
- Платинова група металів (МПГ) – 4, 9, 11, 24, 26, 33, 35, 118
- Польовий шпат – 4, 5, 24, 200
- Постійні магніти – 8, 28, 33

Р

- Ранжування сировини за важливістю – 25, 26
- Раціональне природокористування – 13, 19
- Регламент ЄС 2024/1252 (Закон про CRM) – 23, 24, 25, 39
- Резистентність ланцюгів постачання – 13, 25
- Рециклінг (вторинна переробка) – 10, 22, 23, 35
- Ресурсоефективність (ресурсозбереження) – 10, 15
- Ризик постачання (Supply Risk) – 3, 8, 11, 14, 19, 26, 31, 32, 38
- Рідкісні метали (РМ) – 11, 14, 30, 40
- Рідкісноземельні елементи (РЗЕ) – 4, 5, 8, 11, 14, 21, 26, 28, 33, 35, 40, 42, 145
- Робототехніка – 3, 26, 29, 34, 40, 67
- Родій – 4, 9, 11, 119, 127
- Рутеній – 4, 9, 119, 128

С

- Скандій – 4, 8, 20, 21, 24, 26, 35, 36, 37, 38, 96, 112
- Сонячні електростанції (фотовольтаїка, PV) – 3, 26, 28, 29, 34, 35, 40, 61
- Сподумен-петалітові руди – 6, 262
- Сталий розвиток – 13, 14, 16, 18, 19, 20
- Стратегічна мінеральна сировина – 2, 8, 11, 19, 21, 38
- Стратегічне резервування (Stockpiling) – 10, 25
- Стронцій – 4, 20, 21, 24, 26, 130, 139
- Субституція (заміщення) – 10, 42
- Сурма (стибій) – 4, 5, 20, 21, 24, 26, 179, 188

Т

- Тантал – 4, 11, 20, 21, 24, 35, 36, 38, 96, 113
- Тверді корисні копалини – 9
- Телур (телурові руди) – 20, 21
- Терикони (хвости збагачення) – 9, 15
- Техногенні родовища – 9, 11, 15
- Титан (титанові руди, ільменіт) – 4, 6, 14, 20, 21, 24, 35, 36, 37, 96, 116, 264
- Тягові двигуни (електродвигуни) – 3, 26, 28, 33, 34, 35, 40, 57

У

- Угода про асоціацію між Україною та ЄС – 16

Ф

- Флюорит (плавиковий шпат) – 4, 5, 20, 21, 24, 202
- Фосфатна порода – 5, 6, 24, 204
- Фосфор – 5, 24, 26, 193, 196
- Фотоелектрична технологія (PV) – 26, 28, 29, 34

Х

- Хвостосховища (відходи переробки) – 9, 15

Ц

- Цезій (цезієві руди) – 20, 21
- Цифрові технології (ІТ) – 3, 14, 26, 30, 31, 35, 40, 81
- Цифровий паспорт батареї – 23
- Цинк (цинкові руди) – 20, 21
- Цирконій (цирконієві руди) – 20, 21

Ш

- Шлами (відходи) – 9

Я

- Якість надрокористування – 17

Навчальне видання

Ложніков Олексій Володимирович
Павличенко Артем Володимирович
Шустов Олександр Олександрович
Деревягіна Наталія Іванівна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КРИТИЧНОЮ МІНЕРАЛЬНОЮ СИРОВИНОЮ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ

Навчальний посібник

Видано в авторській редакції

Підписано до друку 15.09.2026. Формат 30×42/2.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 12,4.
Обл.-вид. арк. 16,0. Тираж 100 пр. Зам. № .

Підготовлено до друку
у НТУ «Дніпровська політехніка».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004 р.
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19

Видрукувано в ПП Вахмістров О.Є.
Адреса Видавництва та друкарні:
49000, м. Дніпро, вул. Писаржевського, 18.