

УДК 669.546.3

<https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2022.70.079>

*Ольга ГУЛАЙ, Василина ШЕМЕТ, Тетяна ФУРС*

## **РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ ЯК КРИТИЧНА СИРОВИНА. КОРОТКИЙ ОГЛЯД.**

*Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, 43018 Луцьк, Україна  
hulay@i.ua*

*Висвітлено загальні фізичні властивості рідкісноземельних металів (РЗМ), історію їх відкриття, основні природні ресурси та загальні сфери застосування. Розглянуто критерії, за якими РЗМ належать до критичної сировини (фактор ризику дефіциту, економічна важливість). Найвищу вразливість до обмеження поставок на глобальному рівні мають Європі, Ербій і диспрозій. Найбільший у світі виробник РЗМ з великим відривом від конкурентів – Китай (у 2021 році видобуто близько 168000 метричних тонн рідкісноземельних оксидів). Україна має значні ресурси рідкісноземельних металів, хоча й не добуває їх. Руди більшості родовищ України належать до бідних, які складно залучити в експлуатацію. Акцентовано увагу на технологіях рециклінгу РЗМ.*

*Ключові слова: рідкісноземельні метали, добування, властивості, застосування, критична сировина.*

### **Вступ**

Мінеральні ресурси є основою економічного зростання, поліпшення якості життя, забезпечення національної оборони та загального функціонування сучасного суспільства. Упродовж останнього десятиліття дедалі частіше фігурує поняття «критично важливої сировини». Загальні запаси цієї сировини у первинних родовищах на планеті розподілені нерівномірно, а видобуток зосереджений у окремих країнах [1–3]. Головні характерні ознаки критичної мінеральної сировини (корисної копалини) – важливість її напрямів використання й потенційні ризики дефіциту. Ці фактори мають вирішальне значення для економічної й національної безпеки країни або регіону [3]. Термін «критичний» у різних джерелах застосовують стосовно корисних копалин (critical mineral), сировини (critical commodity, critical material) або елемента (critical element).

Ступінь критичності мінеральної сировини визначають, виконуючи аналіз її поширення, обсягів добування та рециклінгу, внесок у розвиток економік різних країн у світі [4]. Чинниками критичності є зменшення світових запасів та стрімке збільшення різновидів мінеральної сировини, що використовують у новітніх технологіях високотехнологічних секторів економіки.

За наведеними критеріями рідкісноземельні метали (РЗМ) належать до критичної сировини за фактором ризику дефіциту (значення 5...6 при пороговому значенні 1)

та за економічною важливістю (3,6...4,5 при пороговому значенні 2,8) [2]. Найвищу вразливість до обмеження поставок на глобальному рівні мають європій, ербій і диспрозій, тоді як самарій має найнижчу вразливість завдяки високому потенціалу заміщення [5].

Пошукова система Google дає понад 3 млрд посилань на запит «rare earth», що свідчить про зростаючий науковий, економічний і суспільний інтерес до цієї групи металів. Фундаментальні наукові дослідження виявили, що додавання невеликої кількості РЗМ може зробити сплави міцнішими, легшими або більш магнітними. Рідкісноземельні елементи стали вирішальними не тільки для електронних пристроїв, зокрема смартфонів, а й для спеціалізованого військового та медичного обладнання. Їх використовують у радарях, системах електронного керування літаків, окулярах нічного бачення, у техніці зв'язку та в силових установках атомних підводних човнів [7, 8].

РЗМ та сплави на їхній основі є важливою частиною технологій, які зменшують кліматичні зміни, завдяки зменшенню використання викопного палива та підвищенню ефективності споживання енергії. Вагомим сектором використання є вітряні турбіни та електромобілі.

Мета нашої праці – проаналізувати інформацію про рідкісноземельні метали як критичну сировину.

### **Результати аналізу літературних джерел**

Рідкісноземельні метали утворені сімнадцятьма хімічними елементами, до яких належать 15 лантанодів, Скандій та Ітрій. Усі рідкісноземельні метали, крім європію, кристалізуються в одній із щільно упакованих кубічних або гексагональних структур. У табл. 1 наведено фізичні властивості металів [9] (значення з зірочкою взято із <https://uk.periodic-table.io/>). Вони трапляються разом у природі, і їх повного розділення важко досягти. Однак є деякі разючі відмінності, особливо у фізичних властивостях металевих елементів. Наприклад, їхні температури плавлення різняться майже вдвічі, а тиск пари відрізняється більш ніж у один мільярд. За густиною метали поділяють на дві групи – церієву (легкі лантанодиди), в якій виділяють лантанову (La, Ce, Pr) і неодимову (Nd, Sm, Eu, Gd) підгрупи, та ітрієву (важкі лантанодиди) з підгрупами Диспрозію (Tb, Dy, Y, Ho) та Ітербію (Er, Tm, Yb, Lu).

Мінерал, що містить рідкоземельні елементи, був ідентифікований у кінці XVIII століття, в наступні роки виокремили низку металів, починаючи з ітрію (див. табл. 2). Однак знадобилося понад 100 років, перш ніж з'явився перший значний промисловий продукт із рідкісноземельних металів. У 1890 роках хімік Карл Ауер фон Вельсбах розробив кожух із суміші торію та церію для використання з газовими вуличними ліхтарями [7]. У 1945 році внаслідок опромінення Урану-235 був отриманий Прометій (елемент у природі не трапляється).

Природні ресурси РЗМ, незважаючи на їхню назву, досить значні – сумарний масовий вміст лантанідів (разом з лантаном) у земній корі 0,02 % мас., що близько до вмісту міді. Найбільш розповсюдженими є Лантан, Церій і Неодим. Відомо близько 70 власних мінералів РЗМ, вони також входять до складу близько 280 мінералів як домішки. За складом рідкісноземельних елементів ці мінерали поділяються на групи: церієву (бастнезит, паризит, лопарит, монацит, кноптит, евдіаліт); гадолінієву (самарскіт), ітрієву (евксеніт, ксенотім, ітріаліт); ітрій-ітербієву (фергуксоніт); комплексну (ортит, пірохлор, гадолініт, апатит, сфен). Найважливіші

мінерали церієвої підгрупи – монацит, лопарит, бастнезит; ітрієвої – ксенотим, евксиніт, фергусоніт, ітріаліт. Крім того, легкі лантаноїди часто накопичуються в польових шпатах, а важкі – в темнобарвних мінералах.

Таблиця 1

**Фізичні властивості рідкісноземельних металів**

Table 1

**Physical properties of rare earth metals**

РЗМ	Порядковий номер	Атомна маса, а.о.м.	Густина, г/см <sup>3</sup>	T <sub>пл.</sub> , К	T <sub>кип.</sub> , К
Скандій (Sc)	21	44,9559	3,020	1814	3123
Ітрій (Y)	39	88,9059	4,469	1801	3595
Лантан (La)	57	138,9055	6,162	1193	3723
Церій (Ce)	58	140,12	6,789	1077	3700
Празеодим (Pr)	59	140,9077	6,769	1205	3783
Неодим (Nd)	60	144,24	7,007	1297	3303
Прометій (Pm)	61	145,0	7,260	1443	3273
Самарій (Sm)	62	150,36	7,536	1345	2073
Європій (Eu)	63	151,96	5,243*	1099*	1802*
Гадоліній (Gd)	64	157,25	7,895	1585*	3546*
Тербій (Tb)	65	158,9254	(α-Tb)8,27	1629	3496
Диспрозій (Dy)	66	162,50*	8,55*	1680*	2840*
Гольмій (Ho)	67	164,93	8,780	1733	2993*
Ербій (Er)	68	167,26	9,066*	1795	3136
Тулій (Tm)	69	168,9342	9,320	1818	2220
Ітербій (Yb)	70	173,04	6,96	1094	1484
Лютецій (Lu)	71	174,97	9,84	1933	3683

У промисловості використовують такі мінерали [6]:

- фосфати: монацит –  $\text{CePO}_4$ , ксенотим –  $\text{YPO}_4$ , рабдофаніт –  $(\text{Ce}, \text{Y})\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; черчит –  $\text{CePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; апатит  $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3 \cdot (\text{OH}, \text{F})$ ;
- карбонати: бастнезит –  $\text{Ce}[\text{CO}_3] \cdot \text{F}$ ; паризит  $\text{Ce}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_3 \cdot \text{F}_2$ ;
- оксиди: knobтит –  $(\text{Ca}, \text{Ce})(\text{Ti}, \text{Fe})\text{O}_3$ ; лопарит –  $(\text{Na}_2\text{Ce}, \text{Ca} \dots)(\text{Nb}, \text{Ti})\text{O}_3$ ; пірохлор –  $(\text{Na}, \text{Ca}, \text{Ce} \dots)(\text{Nb}, \text{Ti} \dots)_2\text{O}_6$ ; фергусоніт –  $(\text{Y}, \text{Er}, \text{Ce} \dots)(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})\text{O}_4$ , самарскіт –  $(\text{Y}, \text{Er}, \text{Ce})_4(\text{Nb}, \text{Ta})_6\text{O}_{21}$ , евксиніт –  $(\text{Y}, \text{Ce}, \text{Ca} \dots)(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_2\text{O}_6$ , приорит –  $(\text{Y}, \text{Er}, \text{Ca}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb})_2\text{O}_6$ , бранерит –  $(\text{U}, \text{Ca}, \text{Fe}, \text{Y}, \text{Th})_3 \cdot \text{Ti}_5\text{O}_{16}$ ;
- фториди: ітрофлюорит –  $(\text{Ca}, \text{Y}) \cdot \text{F}_{2-3}$ ; ітросинхізіт –  $\text{Ca}, \text{Y}(\text{CO}_3)\text{F}$ ;
- силікати: гадолініт –  $(\text{Y}, \text{Ce})_2\text{FeBe}_2(\text{Si}_2\text{O}_{10})$ ; ітріаліт –  $(\text{Y}, \text{Th})_2(\text{Si}_2\text{O}_7)$ ; ортит –  $(\text{Ce}, \text{Y}, \text{Ca})(\text{Mg}, \text{Al})_2[(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)(\text{O}, \text{OH})]$ ; евдіаліт –  $(\text{Ce}, \text{Y}, \text{Ca})_4\text{FeZr} \times (\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{Cl}, \text{OH})$ .

За оцінками науковців, загальні світові запаси РЗМ становлять приблизно 120 мільйонів тонн. Їхні запаси сконцентровані головню у 34 країнах світу, серед яких 6 країн Європи (враховуючи Росію, Естонію та Гренландію); 14 країн Азії, 10 – Африки, а також США, Канада, Бразилія та Австралія. Більшість мінеральних ресурсів є в Китаї і оцінюється приблизно в 44 мільйони тонн. Після Китаю основними країнами за обсягом запасів РЗМ є В'єтнам, Бразилія та Росія. Сполучені Штати також мають значні запаси, які оцінюються в 1,8 мільйона тонн [10].

Таблиця 2

## Відомості про відкриття рідкісноземельних елементів

Table 2

## Information about the discovery of rare earth elements

РЗМ	Сполуки, з яких добувають	Рік виявлення елемента	Рік виділення в чистому вигляді	Походження назви
Скандій (Sc)	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1879	1937	На честь Скандинавії.
Ітрій (Y)	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1797	1824	На честь шведського селища Іттербу
Лантан (La)	Разом з Ce, Pr і Nd	1839	1923	Від грецького <i>lantano</i> «потайний»
Церій (Ce)	CeF <sub>3</sub>	1803	1825	На честь давньогрецької богині Церери
Празеодим (Pr)	PrF <sub>3</sub> або PrCl <sub>3</sub>	1885	1925	Назва походить від грецького <i>prasios</i> «зелений» та <i>didymos</i> «подвійний»
Неодим (Nd)	NdF <sub>3</sub> або NdCl <sub>3</sub>	1885	1925	З грец. означає «новий близнюк»
Прометій (Pm)	При опроміненні урану-235	1945	1963	На честь міфічного героя Прометея
Самарій (Sm)	SmF <sub>3</sub>	1853	1903	Від назви мінералу самарскіт, у якому його виявили
Європій (Eu)	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> або EuCl <sub>3</sub>	1879	1901	На честь континенту Європа
Гадоліній (Gd)	GdF <sub>3</sub> , GdCl <sub>3</sub>	1880	1935	На честь відкривача мінералу гадолініту фінського хіміка Йогана Гадоліна
Тербій (Tb)	Разом з іншими РЗМ	1843	1905	На честь шведського селища Іттербу
Диспрозій (Dy)	DyCl <sub>3</sub> або DyF <sub>3</sub>	1886	1906	Від грецького <i>disprositus</i> «важкодоступний»
Гольмій (Ho)	HoF <sub>3</sub>	1878	1911	На честь Стокгольма
Ербій (Er)	ErCl <sub>3</sub> або ErF <sub>3</sub>	1843	1934	На честь шведського селища Іттербу
Тулій (Tm)	Разом із Yb і Lu	1879	1911	Від імені острова Туле
Ітербій (Yb)	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1879	1953	На честь шведського селища Іттербу
Лютецій (Lu)	LuF <sub>3</sub>	1907	1953	На честь кельтського поселення Лютеція

Україна має значні ресурси рідкісноземельних елементів, хоча й не добуває їх. Руди більшості родовищ України належать до бідних, які складно залучити в експлуатацію. Тут відомі родовища традиційних типів, які пов'язані з карбонатами (Новополтавське) і маріуполітами (Октябрське), та нетрадиційних: багаті цирконієві і рідкісноземельно-цирконієві руди безнефелінових сіенітів (Азовське і Ястребецьке). Крім того, в Приазов'ї відоме родовище багатих руд церієвої групи (Петрово-Гнугівське), складених паризитом, кальцитом і флюоритом. За вмістом і

складом рідкісноземельних елементів воно подібне до таких родовищ світового класу – Маунтин-Пас, Байан-Обо.

На території України відомі три основні типи порід із ендегенною рідкісноземельною мінералізацією [1, 6]: 1) цирконій-торій-рідкісноземельні в гранітах, сієнітах і пегматитах (Миколаївське і Сабарівське родовища Придністров'я, Ястребецьке – Полісся, Успенський прояв Приазов'я); 2) ітрій-рідкісноземельно-цирконієві в лужних сієнітах (Азовське, Анадольське, Петрово-Гнугівське родовища Приазов'я); 3) уран-торій-ітрій-рідкісноземельні в калієвих і натрієвих метасоматитах (Лозоватське, Калинівське, Южне родовища Кіровоградського УРР, родовище Балка Корабельна).

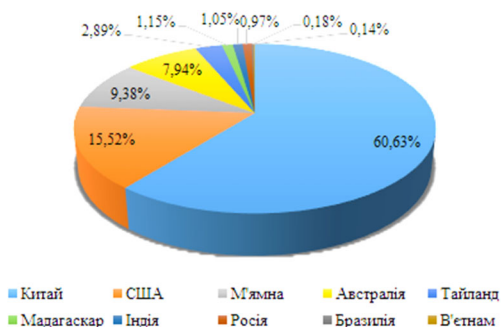
Проблема видобутку РЗМ пов'язана з розпорошеністю у родовищах, нерівномірністю якості та складу рудної сировини, складністю методів екстрагування і відокремлення з суміші чистих металів через їх дуже близькі властивості. У першій половині ХХ століття РЗМ виробляли у незначних кількостях з родовищ гранітного пегматиту, в якому їх вперше виявили. За винятком найбільш поширених лантаноїдних елементів (церію, лантану та неодиму), окремі РЗМ не були комерційно доступні до 1940 років. Між 1965 і 1985 роками більшість РЗМ у світі надходило з родовища Маунтин-Пас, Каліфорнія [11, 12]. Важкі мінеральні піски також були джерелами рідкісноземельних мінералів як побічних продуктів, і Австралія була основним виробником з таких джерел до початку 1990 років. Протягом 1980 років Китай став основним виробником сировини РЗМ, тоді як частка австралійського й американського ринку різко скоротилася (див. рис. 1).

За останнє десятиліття загальний видобуток рідкісноземельних металів у шахтах зріс більш ніж вдвічі: з приблизно 133000 метричних тонн оксидів РЗМ (REO), вироблених у 2010 році, видобуток зріс до приблизно 280000 метричних тонн вмісту REO у 2021 році [10]. Китай є найбільшим у світі виробником РЗМ з великим відривом від конкурентів (див. рис. 1). У 2021 році в Китаї було видобуто близько 168000 метричних тонн рідкісноземельних оксидів. Сполучені Штати Америки, які є другим за величиною виробником РЗМ, видобули близько 43000 метричних тонн у тому ж році.

У глобальних ресурсах середнє співвідношення легких РЗМ (La–Gd) до важких РЗМ (Tb–Lu і Y) становить 13:1. Ці поклади містять у середньому 81 ppm торію і 127 ppm урану, які зумовлюють утворення радіоактивних відходів, пов'язаних із видобутком і переробкою РЗМ. Моделювання глобальних показників виробництва 2012 – 110 тис. т у поєднанні з передбачуваним 5% річним зростанням попиту на РЗМ свідчить про те, що відомі ресурси можуть підтримувати виробництво до 2100 року, отже геологічний дефіцит не є нагальною проблемою [13].

На розвиток ресурсів РЗМ мають суттєвий вплив екологічні, економічні та соціальні фактори. Одним із них є радіоактивні домішки. Крім того, процес видобутку і виробництва супроводжується появою великої кількості відходів. Виробництво однієї тонни рідкісноземельних металів генерує 12 тисяч тонн рідких і 2 тисячі тонн твердих промислових відходів. У зв'язку з цим у багатьох країнах діють екологічні обмеження на відкриття нових шахт.

Вчені визнають, що попит на РЗМ збільшується приблизно на 8% на рік завдяки зростанню застосування в споживчих продуктах, комп'ютерах, автомобілях, літаках та інших передових технологічних продуктах. Значна частина цього зростання попиту зумовлена новими технологіями, які підвищують енергоєфективність і замінюють викопне паливо [14].



**Рис. 1.** Розподіл виробництва РЗМ у світі станом на 2021 рік [10].

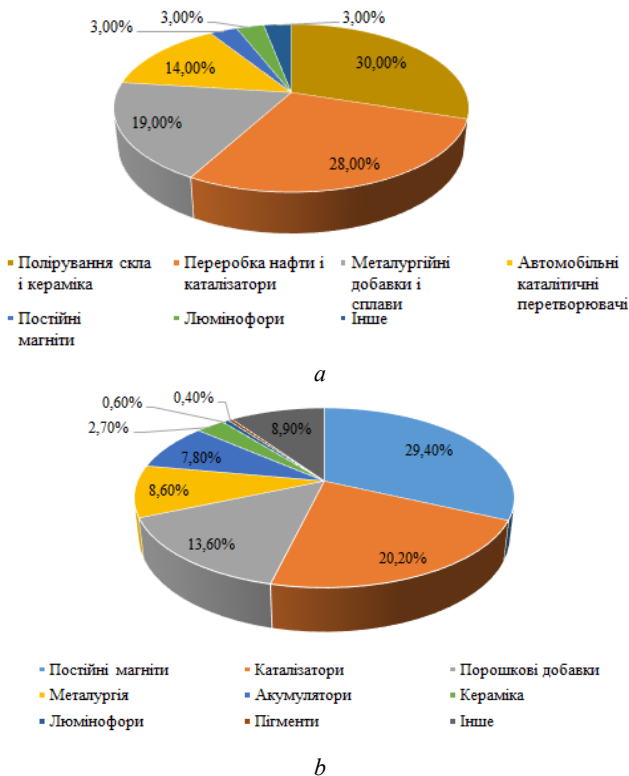
**Fig. 1.** Distribution of REE production in the world as of 2021 [10].

Структура використання РЗМ суттєво змінилася за останні 20 років (див. рис. 2). Якщо у 90-х роках ХХ століття близько третини ресурсів використовували для полірування скла та виготовлення кераміки, то сьогодні цей сегмент займають постійні магніти різного застосування. Незмінно високою є частка використання РЗМ як каталізаторів у нафтопереробній та інших галузях промисловості. Інформація про використання окремих РЗМ у виробництві основних промислових товарів наведена у табл. 3 [15]. Розглянемо детальніше застосування сплавів РЗМ як потужних магнітів.

Рідкісноземельні магніти стали практично незамінними в широкому спектрі стратегічних галузей: аерокосмічна, автомобільна, електронна, медична та військова промисловість. Гонка за розробкою нових видів зброї під час холодної війни між Сполученими Штатами та Радянським Союзом (1947–1991) призвела до різноманітного використання рідкісноземельних металів та їхніх сполук. Вони стали необхідним елементом виробництва більшості видів високоточного озброєння, включно з реактивними двигунами, системами наведення ракет, літаками-винищувачами та супутниками. Основні інгредієнти цих високоефективних магнітів – інтерметалічні сполуки  $RECo_5$ ,  $RE_2Me_{17}$  і  $RE_2Me_{14}B$  (Me: перехідний метал) [16]. Потужні магнітні властивості – висока індукція та коерцитивна сила – виникають завдяки унікальним  $3d-4f$  взаємодіям між перехідними металами та рідкісноземельними елементами. Вже понад 40 років ці магніти залишаються вибором номер один у пристроях, що потребують високих магнітних полів в екстремальних умовах експлуатації (високі сили розмагнічування та висока температура).

Енергетична криза зумовлює активне використання альтернативних джерел енергії. Важкі рідкісноземельні метали та постійні магніти є критичними для багатьох технологій відновлюваної енергетики [17]. Вітряні турбіни є одним із застосувань, де використання рідкісноземельних елементів може різко збільшитись у найближчі роки. Турбіни з прямим приводом працюють завдяки неодимовим і диспрозієвим постійним магнітам. Виробництво електроенергії з енергії вітру не призводить до викидів вуглекислого газу, тому це буде важливою частиною змен-

шення кліматичних змін. Неодим, який найчастіше використовується у високо-ефективних магнітах, є одним з найбільш критичних рідкісноземельних елементів щодо доступності [18]. РЗМ також активно використовують для високоєфективних двигунів гібридно-електричних транспортних засобів. Ці напрями важливі для реалізації Європейської зеленої угоди, яка має на меті зробити Європу нейтральною до вуглецю до 2050 року.



**Рис. 2.** Розподіл виробництва РЗМ у світі за країнами: а – 1990 роки [11]; б – станом на 2021 рік [10].

**Fig. 2.** Distribution of REE production in the world by country: а – 1990s [11]; б – as of 2021 [10].

Отже, РЗМ життєво важливі для сучасних технологій і суспільства, і є одними з найбільш критичних елементів. Незважаючи на ці факти, зазвичай лише близько 1% РЗМ переробляється з кінцевої продукції, а решта вивозиться у відходи та вилучається з циклу матеріалів [19]. У минулому більшість викинутих продуктів і відходів від переробки потрапляли на звалище або скидали в океан. Надійна переробка рідкісноземельних металів може стати значним джерелом постачання в середньостроковій перспективі. Переробка має кілька потенційних переваг перед первинним виробництвом, зокрема тому, що дає змогу уникнути дорогих етапів

виділення маловартісних РЗМ (La і Ce), а також радіоактивних елементів, які трапляються. Відпрацьовані пристрої часто мають більший вміст високоцінних РЗМ, аніж багато інших нетрадиційних джерел (наприклад, побічні продукти вугілля або відходи видобутку фосфатів) [20].

Таблиця 3

Використання окремих РЗМ у виробництві основних промислових товарів, % [15]

Table 3

The use of individual REE in the production of basic industrial goods, % [15]

Сфери використання	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Інші
Магніти	–	–	23	69	–	–	2	–	5	–	–
Батареї	50	33	3	10	3	–	–	–	–	–	–
Металеві сплави	26	52	6	16	–	–	–	–	–	–	–
Автокаталізатори	5	90	2	3	–	–	–	–	–	–	–
Каталізатори крекінгу нафти	90	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Полірити оптичні	31	65	4	–	–	–	–	–	–	–	–
Добавки в скло	24	66	1	3	–	–	–	–	–	2	4
Люмінофори	8	11	–	–	–	5	2	5	–	69	–
Кераміка	17	12	6	12	–	–	–	–	–	53	–
Інше	19	39	4	15	2	–	1	–	–	19	–

Переробка рідкісноземельних металів із електронних відходів може суттєво сприяти сталості та захисту навколишнього середовища. Згідно з даними за 2016 рік, у всьому світі було утворено 44,7 мільйонів тонн електронних відходів, а за прогнозами фахівців їх буде ще більше в майбутньому [21; 22]. Перешкоди на шляху переробки охоплюють неефективний (або взагалі немає) збір відпрацьованих елементів, високу вартість демонтажу для вилучення компонентів, що містять цільові елементи, та брак економічно ефективних методів відновлення з переробленої сировини [23].

Перспективною вторинною сировиною є та, що містить значну кількість критичних рідкісноземельних металів, та доступна для економічно ефективного збору та попередньої обробки. До такої сировини належать постійні магніти від жорстких дисків (HDD), низькопрофільні динаміки в телевізорах і мобільних пристроях, а також компактні двигуни/генератори, такі як тягові двигуни електричних і гібридних транспортних засобів.

Вибір технології переробки також важливий для відновлення ресурсів. Вторинне виробництво РЗМ знижує економічні витрати до 70 разів [22]. Основними шляхами відновлення є гідрометалургійний і прометалургійний методи. Автори [18] дійшли висновку, що переробка шляхом ручного демонтажу гірша, ніж первинне виробництво, у цьому випадку деякі екологічні показники зростають на порядок. Тоді як



ручне розбирання загалом дає змогу відновити весь магнітний матеріал, подрібнення призводить до дуже низького рівня відновлення (<10%).

Останніми роками досліджують й альтернативні екологічно безпечні способи отримання РЗМ. Зокрема, фітоекстракція – перспективна для зменшення забруднення РЗМ і для циркуляції ресурсів. У [24, 25] узагальнено найновіші дослідження, що стосуються гіперакумулятивних рослин РЗМ і відповідних механізмів накопичення.

## Висновки

Рідкісноземельні метали незамінні для інфраструктури, технологій і сучасного способу життя, що призвело до зростання попиту на ці елементи. У довгостроковій перспективі він зростатиме відповідно до прогресів у сфері зелених технологій і високотехнологічних пристроїв. РЗМ визнані критичними через потенційний дефіцит, обмеження постачання та відсутність концентрацій, які можна видобути. На нинішньому світовому ринку рідкісноземельних оксидів домінує китайське виробництво. Тому необхідні альтернативні джерела та новітні рециклінгові технології, щоб задовольнити попит і продовжити виробництво рідкісноземельних продуктів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Rudko H., Bala H.* Critical mineral raw materials and their prospects in Ukraine. Mineral resources of Ukraine. 2021. Vol. 2. P. 272. (in Ukrainian). (<https://doi.org/10.31996/mru.2021.2.3-14>).
2. European Commission. Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report. 2020. (<https://doi.org/10.2873/11619>).
3. *Schulz K.J., DeYoung J.H., Seal R.R., Bradley D.C.* Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply. Geological Survey, Reston, Virginia: 2017. 797 p. (<http://doi.org/10.3133/pp1802>).
4. Mineral Commodity Summaries 2020. USGS (United States Geological Survey). 2020. 204 p. (<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>).
5. *Nassar N.T., Xiaoyue Du, Graedel T.E.* Criticality of the Rare Earth Elements. Journal of Industrial Ecology. 2015. Vol. 19(6). P. 1044–1054. (<http://doi.org/10.1111/jiec.12237>).
6. *Hrinchenko O.V., Kurylo M.V., Mykhailov V.A. et al.* Metallic minerals of Ukraine. Kyiv: «Kyivskyi universytet», 2006. 218 p. (in Ukrainian).
7. Science Matters: The Case of Rare Earth Elements. (<https://www.sciencehistory.org/learn/science-matters/case-of-rare-earth-elements/manufacturer-case-study>).
8. *Duriahina Z.A., Trostianchyn A.M.* Rare earth metals. In: Traded Entrepreneurship: Development Mechanism and Financial Support. Lviv: Vyd-vo Lvivskoi politekhniky, 2015. P. 318–343. (in Ukrainian).
9. Small Mining Encyclopedia: in 3 vol. / ed. V.S. Biletsky/ D.: Eastern Publishing House, 2013. Vol. 3. 644 p. (in Ukrainian).
10. <https://www.statista.com/>.
11. *Castor S.B., Hedrick J.B.* Rare Earth Elements. Industrial Minerals Vol. 7th Ed. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, Colorado, 2006. P.769–792.
12. *Haxel G.* Rare earth elements: critical resources for high technology. US Department of the Interior, US Geological Survey. 2002. Vol. 87(2). (<https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/fs087-02.pdf>)

13. *Wenig Z., Jowitt S.M., Mudd G.M., Haque N.* A Detailed Assessment of Global Rare Earth Element Resources: Opportunities and Challenges. *Economic Geology* 2015. Vol. 110(8). P. 1925–1952. (<https://doi.org/10.2113/econgeo.110.8.1925>).
14. *Long K.R., Van Gosen B.S., Foley N.K., Cordier D.* The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States: A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective. In: *Sinding-Larsen, R., Wellmer, F.W.* (eds) *Non-Renewable Resource Issues. International Year of Planet Earth.* Springer, Dordrecht. 2012. ([https://doi.org/10.1007/978-90-481-8679-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8679-2_7)).
15. *Mancheri N., Sundaresan L., Chandrashekar S.* Dominating the World. China and the Rare Earth Industry. National Institute of Advanced Studies, Bangalor, 2013. 54 p.
16. *Dent P.* Rare earth elements and permanent magnets. *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 111. 07A721. (<https://doi.org/10.1063/1.3676616>).
17. *Stegen K.S.* Heavy rare earths, permanent magnets, and renewable energies: An imminent crisis. *Energy Policy.* 2015. Vol. 79. P. 1–8. (<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.12.015>).
18. *Sprecher B., Xiao Y., Walton A. et al.* Life Cycle Inventory of the Production of Rare Earths and the Subsequent Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets. *Environ. Sci. Technol.* 2014. Vol. 48(7). P. 3951–3958. (<https://doi.org/10.1021/es404596q>).
19. *Jowitt S.M., Werner T.T., Weng Z., Mudd G.M.* Recycling of the rare earth elements. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry.* 2018. Vol. 13. P. 1–7. (<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.008>).
20. *Fujita, Y., McCall S.K., Ginosar D.* Recycling rare earths: Perspectives and recent advances. *MRS Bulletin.* 2022. (<https://doi.org/10.1557/s43577-022-00301-w>).
21. *Talan D., Huang O.* A review of environmental aspect of rare earth element extraction processes and solution purification techniques. *Minerals Engineering.* 2022. Vol. 179. 107430. (<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107430>).
22. *Amato A., Becci A., Birloaga I., et al.* Sustainability analysis of innovative technologies for the rare earth elements recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2019. Vol. 106. P. 41–53. (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.029>).
23. *Haque N., Hughes A., Lim S., Vernon C.* Rare earth elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. *Resources.* 2014. Vol. 3(4). P. 614–635. (<https://doi.org/10.3390/resources3040614>).
24. *Chen Haibin, Chen Haimei, Chen Zhibiao.* A review of in situ phytoextraction of rare earth elements from contaminated soils. *Inter. J. Phytoremediation.* 2021. Vol. 24(6). P. 557–566. (<https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1957770>).
25. *Goldeinstein J.P.N., Bassin J.P.* Biosorption as a Strategy for the Recovery of Rare Earth Elements. *Biosorption for Wastewater Contaminants.* 2022 P. 201–212. (<https://doi.org/10.1002/9781119737629.ch11>).

## SUMMARY

*Olha HULAI, Vasylyna SHEMET, Tetiana FURS*

### RARE EARTH METALS AS A CRITICAL RAW MATERIAL. QUICK OVERVIEW

*Lutsk National Technical University,  
Lvivska st., 75, 43018 Lutsk, Ukraine  
e-mail: hulay@i.ua*

Rare earth metals REE is vital to modern technology and society and are among the most critical elements. The general physical properties of REE, the history of their discovery, the main natural resources and general applications are highlighted. The criteria by which REE belong to critical raw materials (deficit risk factor,

economic importance) are considered. Europe, erbium and dysprosium have the highest vulnerability to supply constraints at the global level. The world's largest producer of REE by a wide margin from competitors is China (in 2021, about 168000 metric tons of rare earth oxides were mined).

Ukraine has significant resources of rare earth metals, although it does not produce them. Here are known deposits of both traditional types associated with carbonates (Novo-Poltava) and Mariupolites (Oktyabrsk) and non-traditional: rich zirconium and rare earth-zirconium ores of non-core sites (Azov and Yastrebitske). Ores of most deposits of Ukraine belong to the poor, which are difficult to attract into operation.

The structure of REE use has changed significantly over the past 20 years. If in the 90s of the twentieth century about one-third of resources were used for polishing glass and making ceramics, today this segment is occupied by permanent magnets of various applications. Rare earth magnets have become virtually indispensable in a wide range of strategic industries such as aerospace, automotive, electronic, medical and military industries. REE is actively used for high-efficiency engines of hybrid-electric vehicles and in wind power.

Attention is focused on REE recycling technologies. Only about 1% of RSM is processed from final products, and the rest is taken out of waste and removed from the material cycle. The main ways of recovery are hydrometallurgical and pyrometallurgical methods, as well as phytoextraction. Recycling rare earth elements from e-waste can significantly contribute to sustainability and environmental protection.

*Keywords: rare earth metals, extraction, properties, application, critical raw materials.*

Стаття надійшла: 19.06.2022.

Після доопрацювання: 05.08.2022.

Прийнята до друку: 30.09.2022.