

УДК 338.1:519.2
JEL Classification: C10, L10

DOI: 10.37332/2309-1533.2024.1.26

Новосад І.Я.,
канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедри прикладної математики,
Руська Р.В.,
канд. екон. наук, доцент,
доцент кафедри прикладної математики,
Пласконь С.А.,
канд. екон. наук, доцент,
доцент кафедри прикладної математики,
Західноукраїнський національний університет, Тернопіль

РІДКОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ: КЛЮЧОВІ КОМПОНЕНТИ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Novosad I.Ya.,
cand.sc.(tech.), assoc. prof.,
associate professor at the department of applied mathematics,
Ruska R.V.,
cand.sc.(econ.), assoc. prof.,
associate professor at the department of applied mathematics,
Plaskon S.A.
cand.sc.(econ.), assoc. prof.,
associate professor at the department of applied mathematics,
West Ukrainian National University, Ternopil

RARE EARTH METALS: KEY COMPONENTS OF MODERN TECHNOLOGIES

*У світі, де ресурси є ключем, контроль над ними – це
ключ до впливу та переваги.
Льюїс Баккетт*

Постановка проблеми. У сучасному світі існує кілька стратегічних ресурсів, які мають важливе значення для економіки, політики, технологій та безпеки країн. Деякі з них включають: нафта та природний газ, рідкоземельні елементи, вода, метали, технології та інтелектуальна власність.

Ці стратегічні ресурси стали об'єктом уваги через їхнє велике значення для сучасного світу, вплив на економіку, політику та технологічний прогрес. Контроль над ними може мати важливі наслідки для країн та геополітичних відносин.

Предметом нашої уваги є рідкоземельні елементи, які відіграють важливу роль у сучасному житті через їхні унікальні властивості, що знаходять застосування у багатьох технологічних, електронних, медичних та інших галузях. Вони мають критичне значення для багатьох високотехнологічних виробництв і їх використання в сучасному житті продовжує зростати з розвитком нових технологій.

Рідкоземельні елементи (РЗЕ) – це група хімічних елементів, яка складається з 17 елементів періодичної таблиці Менделєєва. Вони мають унікальні хімічні властивості та застосовуються у виробництві високотехнологічних пристроїв, електроніки, магнітів, каталізаторів, оптики та у багатьох технологічних, електронних, медичних та інших галузях:

- електроніка: РЗЕ використовуються в виробництві електронних пристроїв, таких як мобільні телефони, комп'ютери, магніти для жорстких дисків тощо;
- зелена енергія: деякі РЗЕ використовуються для виготовлення магнітів у вітрових турбінах та електромоторах електромобілів;
- каталізатори: елементи, такі як церій, використовуються у каталізаторах для автомобільних вихлопних систем для зменшення шкідливих викидів;
- оптика: РЗЕ знаходять застосування у виробництві лазерів, оптичних волокон, екранів для телевізорів і моніторів;

– медицина: деякі РЗЕ використовуються у виробництві магнітної резонансної томографії (МРТ) та інших медичних пристроїв.

З кожним роком попит на складну електроніку зростає серед компаній і споживачів. Для виготовлення цієї електроніки необхідно використовувати більше металів, проте їхні запаси обмежені, а політичні конфлікти створюють ризики в обсягах постачання.

Напружені відносини між Китаєм та США, військові перевороти на Африканському континенті, війна в Україні і на Близькому Сході, енергетична криза – всі ці чинники перетворили постачання рідкісних металів на проблему національної безпеки для багатьох передових країн.

Паралельно ціни на ці матеріали досягли десятирічних піків і впливають на вартість електронної техніки. Це відображається у зростанні цін на все: від китайських музичних колонок до обладнання для передових американських винищувачів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рідкісноземельні метали утворені сімнадцятьма хімічними елементами, до яких належать 15 лантаноїдів, Скандій та Ітрій (див. табл. 1). 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 густину метали поділяють на дві групи – церієву (легкі лантаноїди), в якій виділяють лантанову (La, Ce, Pr) і неодимову (Nd, Sm, Eu, Gd) підгрупи, та ітрієву (важкі лантаноїди) з підгрупами Диспрозій (Tb, Dy, Y, Ho) та Ітербій (Er, Tm, Yb, Lu) [2].

Таблиця 1

Рідкоземельні елементи включаючи 15 лантаноїдів, скандій та ітрій

Порядковий номер	21	39	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Назва РЗЕ	Sc Скандій	Y Ітрій	La Лантан	Ce Церій	Pr Празеодим	Nd Неодим	Pm Прометій	Sm Самарій	Eu Європій	Gd Гадоліній	Tb Тербій	Dy Диспрозій	Ho Гольмій	Er Ербій	Tm Тулій	Yb Ітербій	Lu Лютецій

Джерело: складено авторами на основі періодичної таблиці Менделєєва

Перший рідкоземельний елемент, (Y) ітрій, був відкритий у 1794 році шведським хіміком Йоханом Гадоліном. У 1803 році Гадолін та Йонс Йакоб Берзелиус виявили ще два рідкоземельних елементи: (Sm) самарій і (Tb) тербій. З часом інші рідкоземельні елементи були відкриті та видобуті. Проте, їх видобуток, зазвичай, був складним через їх розповсюдженість у природі та технологічні труднощі в отриманні.

Зарубіжні та вітчизняні вчені, такі як Карл Густав Мосандер, Фредерік Сьоренсен, Глен Т. Сейборг, Юрій Тсірлін та багато інших спеціалістів з хімії, фізики та матеріалознавства внесли важливий вклад у розвиток нашого розуміння рідкоземельних матеріалів, їх властивостей, застосування та методів отримання. Інша плеяда вчених, таких як Карл Айвенсен, Габор Ковач, Іонела Карантоніс, Лі Чжао та багато інших внесли значний внесок у вивчення та розуміння ринку рідкоземельних матеріалів, їхніх властивостей та потенційних застосувань у високотехнологічних галузях.

У другій половині 20-го століття рідкоземельні елементи стали ключовими у виробництві електроніки, магнітів, каталізаторів, оптичних приладів та інших сучасних технологій. Китай володіє значними ресурсами РЗЕ та контролює значну частку глобального видобутку, що породжує геополітичні напруги у сфері постачання. Сьогодні проводяться дослідження нових методів видобутку РЗЕ та їхнього використання у сферах, таких як відновлювальна енергетика, медицина, космічні технології та інші галузі. Це свідчить про активний розвиток вивчення та використання РЗЕ, які стали невід'ємною складовою сучасних технологій та промисловості. Тому дослідження шляхів постачання рідкоземельних матеріалів та питання про те, де лежать майбутні виклики і як може розвиватися конкуренція за ресурси, залишаються недостатньо вивченими і вимагають подальших досліджень.

Постановка завдання. Мета статті – провести комплексний аналіз шляхів постачання рідкоземельних елементів та спрогнозувати розвиток ринку цих елементів у сучасних умовах, що виникають внаслідок війни та інших чинників.

Виклад основного матеріалу дослідження. Метали майбутнього, відомі як рідкоземельні, такі як неодим, празеодим, тербій, індій та ін., мають важливе значення у виготовленні магнітів, акумуляторів

ляторів, електроніки та інших високотехнологічних пристроїв. Їх використання в промисловості постійно розширюється завдяки неперервному вдосконаленню технологій. Ці метали та їх сполуки вважаються ключовими для розвитку сучасних технологій і складовою частиною численних інноваційних виробів, які набувають популярності та застосування у майбутньому.

У 2022 році в ЄС помітно збільшилася кількість імпортованих рідкоземельних елементів. Загалом було імпортовано 18 тис. тонн, що на 9 % більше, ніж у 2021 році, але експорт склав 7 тис. тонн, менше на 8 %, ніж рік тому. Вартість імпорту зросла до 146 млн євро, що на 37 % перевищує показники 2021 року, а експорт досяг 142 млн євро, що на 2 % більше, ніж у попередньому році. Цей критичний сировинний матеріал характеризується високим ризиком поставок і має значне економічне значення, оскільки використовується у різних високотехнологічних секторах [3].

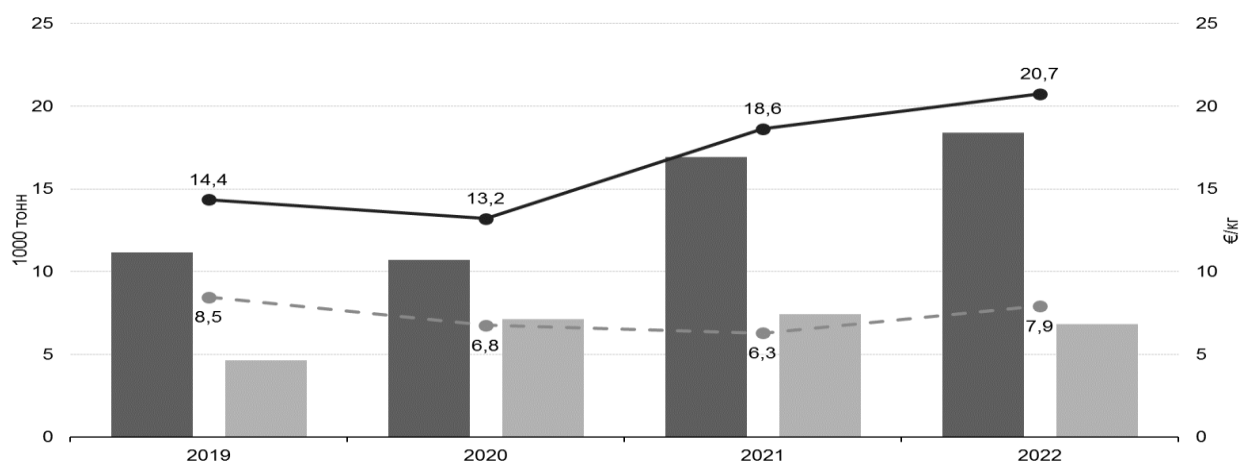


Рис. 1. Імпорт та експорт РЗЕ у ЄС, скандію та ітрію, 2022 рік

— - експорт, - - - - - імпорт, €/кг; ■ - експорт, □ - імпорт, тис. тонн)

Джерело: [3]

Середня ціна імпорту становила 7,9 євро за кілограм, що на 26 % більше порівняно з 2021 роком, тоді як ціна експорту становила 20,7 євро за кожен кілограм рідкоземельних елементів, що на 11 % більше. Найбільшим імпортним партнером РЗЕ став Китай, чий обсяг становить 40 % від загального імпорту, що дорівнює 7,4 тис. тонн. На другому місці розташувалася Малайзія, яка посідала 31 % імпорту або 5,6 тис. тонн, а третє місце зайняла Росія із 25 % імпорту або 4,5 тис. тонн. Сполучені Штати та Японія склали по 2 % в загальному обсязі імпорту рідкоземельних елементів до ЄС (рис. 2) [3].

Ринок рідкісноземельних елементів – це сфера економіки, яка охоплює виробництво, видобуток, торгівлю та споживання рідкісноземельними металами і сполуками. Цей ринок є ключовим у забезпеченні різних галузей промисловості та технологій необхідними матеріалами для виробництва високотехнологічних пристроїв.

Основні аспекти ринку рідкоземельних елементів включають:

1. Видобуток та постачання: багато рідкоземельних елементів видобуваються переважно з обмеженими джерелами по всьому світу. Китай володіє значною часткою видобутку РЗЕ, але інші країни, такі як Австралія, США, Росія та інші, також мають відомі резерви.

2. Використання в промисловості: рідкоземельні елементи використовуються в різних галузях, включаючи виробництво електроніки, магнітів, каталізаторів, оптичних приладів та багато іншого.

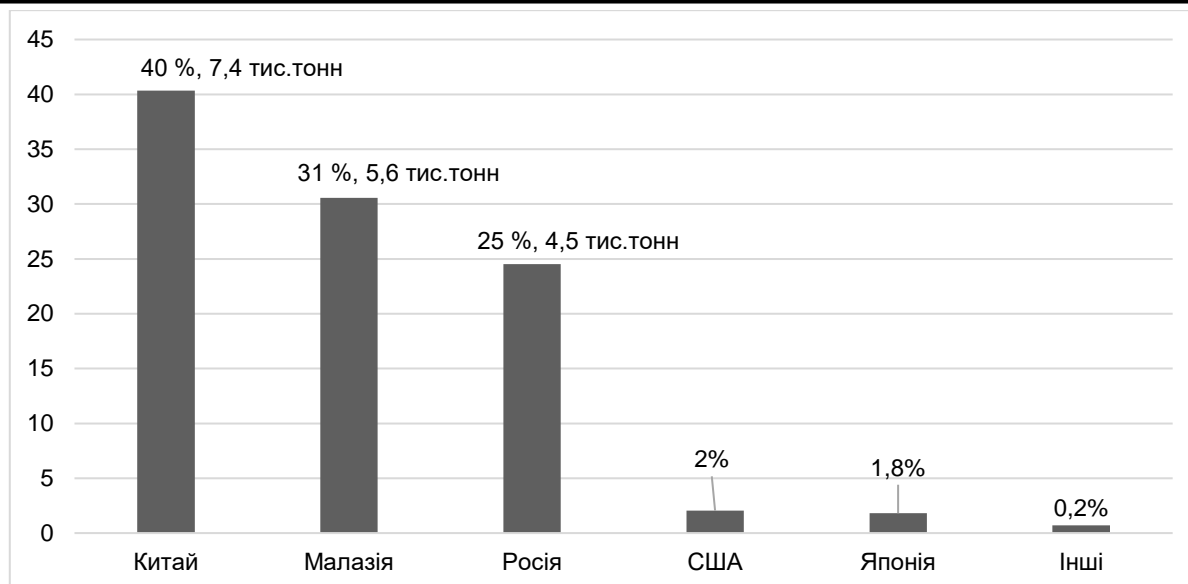


Рис. 2. Імпорт рідкоземельних елементів до ЄС у 2022 р.
(% від загального імпорту)

Джерело: [3]

3. Споживачі: кінцеві споживачі рідкоземельних елементів включають виробників електроніки, автомобільної промисловості, виробників електромобілів, медичні технології та інші галузі, які потребують ці цінні матеріали для свого виробництва.

4. Світові ціни та тенденції: ціни на рідкоземельні елементи можуть коливатися в залежності від попиту, постачання, політичних аспектів, а також наукових та технологічних інновацій.

5. Політичний аспект: у зв'язку з обмеженими ресурсами та географічними обмеженнями, контроль над постачанням РЗЕ може стати предметом геополітичних і економічних суперечок між країнами.

Це ринок, який стає все важливішим у сучасній економіці, оскільки рідкоземельні елементи відіграють ключову роль у виробництві високотехнологічних продуктів і пристроїв, і їх використання поширюється в різних сферах людської діяльності.

Розглянемо основні технології, які використовують рідкоземельні елементи та мають значний вплив у сфері електричних автомобілів. Аналізуючи ці технології, можна виявити тенденції використання РЗЕ, шляхи їх оптимізації, альтернативні матеріали чи технології заміщення, які допоможуть зменшити залежність від обмежених ресурсів РЗЕ. Це є важливим етапом для розуміння можливостей їхнього ефективнішого використання та збалансованого розвитку технологій у майбутньому.

В нашому прогнозуванні ми розглянемо перехід до кліматично нейтральної економіки, орієнтованої на концепцію «Чистої планети для всіх». Це дослідження розглядає впровадження відновлюваних джерел енергії та електромобілів як ключові чинники, у площину попиту на сировинні ресурси. Ринок споживання ЄС розглядається як найбільш перспективний в контексті прогнозованого попиту на сировину рідкоземельних елементів. Результати прогнозів відобразатимуть різні рівні зростання – від високого до низького рівня розгортання цих технологій до підвищення або зниження ефективності використання матеріалів, і тому їх слід розглядати скоріше як діапазон, ніж як фактичні значення.

Акумуляторна технологія на основі літій-іону – це технологія створення акумуляторів, яка використовує літій-іони як основний елемент для зберігання енергії. Ці акумулятори складаються з анодів і катодів, що взаємодіють через рідкий або твердий іонний провідник (електроліт), що містить іони літію. Технологія літій-іонних акумуляторів застосовується в широкому спектрі пристроїв, що дозволяє їм покращену потужність та енергоефективність порівняно з тими, що використовуються в даний час свинцево-кислотними акумуляторами. У літій-іонних акумуляторах використовуються різні метали. На рис. 3 перелічено найпоширеніші матеріали, що використовуються в акумуляторах та їхні функціональні можливості. Розвиток та майбутнє поширення цих технологій переважно зумовлені цивільним попитом на смартфони, ноутбуки, електромобілі, стаціонарні накопичувачі енергії та інші пристрої.

Стратегічна сировина

Графіт (природний чи синтетичний) є високочистим матеріалом для анодів у всіх видів літій-іонних акумуляторів	C	Cu	Мідь використовується як струмопровідна фольга на анодній стороні, у проводах та інших елементах для передачі струму
Кремній використовується у анодах для підвищення енергетичної щільності	Si	Al	Алюміній використовується у якості матеріалу для упаковки акумуляторів або як струмоприймальна фольга (катод)
Титан застосовується у матеріалах для анодів та покриттях, в літійово-титанатному оксиді, який використовується у батарейних системах для упаковки енергії	Ti	Mn	Марганець застосовується у складі катодних матеріалів
Ніобій застосовується як матеріал, яким покривають аноди та катоди з метою підвищення стабільності та ефективності зберігання енергії	Nb	Ni	Нікель застосовується у формі гідроксиду чи інтерметалічних сполук у літій-іонних акумуляторах
Кобальт застосовується у складі катодних матеріалів у акумуляторах	Co		
Літій використовується як літій-кобальтовий оксид у ролі катоду та як сіль у вигляді електроліту у літій-іонному акумуляторі	Li		

**Рис. 3. Матеріали, які використовуються у акумуляторах літій-іонного типу**

Джерело: [4]

З усіх матеріалів, які зараз використовуються у виробництві акумуляторів, кобальт, природний графіт, літій, кремній, титан і ніобій є критично важливими у списку [4]. На рис. 4 показані ключові країни в логістичній мережі постачання літій-іонних елементів. Наприклад, ЄС виробляє лише 1 % всієї сировини для акумуляторів, а обсяги виробництва 0,2 % літій-іонних елементів (нижче подано дані щодо світового видобутку у відсотках):

– **Co** (кобальт) – Демократична Республіка Конго (54 %), Китай (8 %, (і 46 % очищеного кобальту)), Канада (6 %, (і 6 % очищеного кобальту)), Нова Каледонія (5 %), Австралія, (5 %), Бельгія (6 % очищеного кобальту), Фінляндія (13 % очищеного кобальту);

– **Li** (літій) – Чилі (40 % (і 32 % очищеного літію)), Австралія (29 %) та Аргентина (16 % (і 20 % очищеного літію)) переважно з розсолів і сподуменів; Китай (45 %) з переробки літійових твердих гірських порід;

– Китай є основним постачальником очищеного графіту, анодних матеріалів, а також NMC (нікель-марганцево-кобальтовий оксид) і LCO (кобальт-оксид літію) з перероблених матеріалів;

– Японія є основним постачальником катодного матеріалу NCA (літійово-нікелево-кобальтовий оксид);

– Китай, Японія та Південна Корея постачають 86 %, ЄС – 8 % перероблених матеріалів і компонентів для літій-іонних акумуляторів у всьому світі.

Вони мають важливе значення у видобутку, виробництві компонентів та постачанні сировини для літій-іонних акумуляторів [4; 5; 6].

Понад дві третини світового виробництва літій-іонних елементів становить Китай – 66 %, тоді як інші постачальники забезпечують лише близько 8 % світового виробництва. Отже, існує обмежена можливість для диверсифікації поставок [4]. Конкуренція між виробниками компонентів, виробниками комплектуючих та постачальниками на міжнародному рівні ймовірна з метою захисту їхньої логістичної мережі акумуляторів і забезпечення доступу до п'яти основних сировинних матеріалів для літій-іонних акумуляторів: літію, кобальту, нікелю, графіту та марганцю.

Акумулятори для електричного транспорту. Було проаналізовано різні сценарії розвитку електромобільного парку з акумуляторними батареями у ЄС (див. рис. 5). Прогнозується швидкий розвиток електричного транспорту за обраним сценарієм, при цьому Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) розглядаються як технологія перехідного періоду з великою кількістю у складі автопарку до 2030 року, із подальшим стрімким зменшенням.

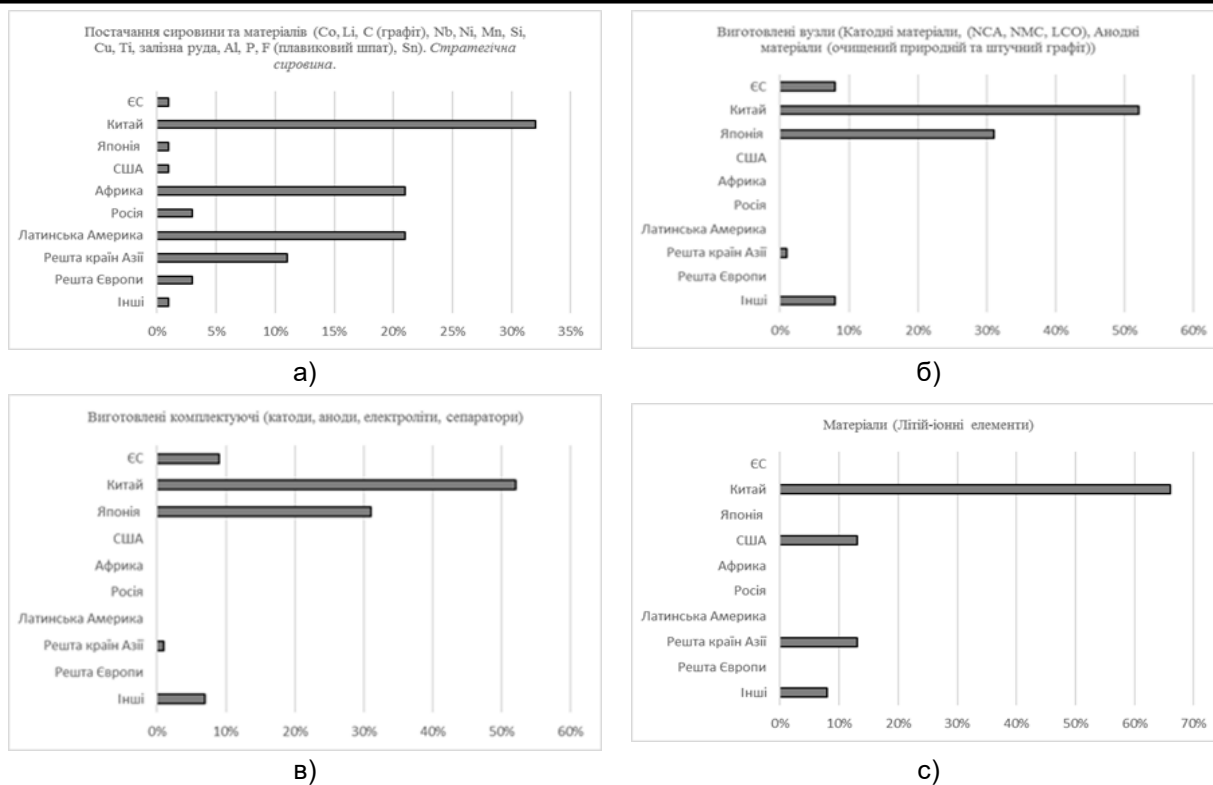


Рис. 4. Ключові країни в логістичній мережі постачання літій-іонних елементів

(а) – країни які постачають критичну сировину та матеріали літій-іонних акумуляторів; б) – країни які виготовляють вузли для літій-іонних акумуляторів; в) – країни які виготовляють комплектуючі для літій-іонних акумуляторів; г) – країни які постачають матеріали (літій-іонні елементи)

Джерело: [4; 7; 8]

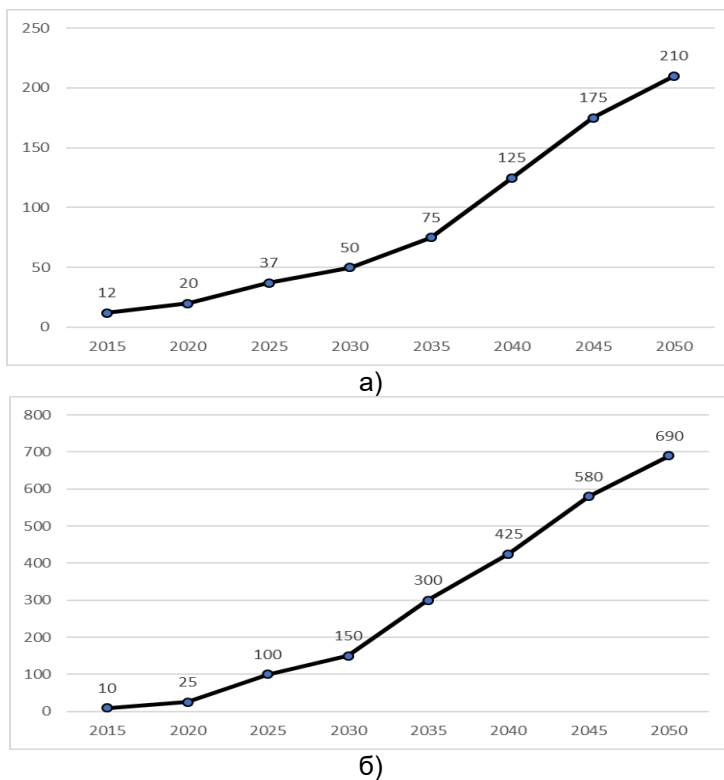


Рис. 5. Прогнозований парк електромобілів з батареями та ємність акумуляторних батарей в ЄС: а) – враховується парк електромобілів / підключених гібридних електромобілів (автопарк вимірюється у млн транспортних засобів); б) – потужність систем зберігання енергії (ESS) (ємність акумулятора вимірюється у ГВт./год).

Джерело: побудовано за результатами авторського моделювання

На основі даних автопарку можна визначити обсяги постачання акумуляторів на ринок ЄС, а також прогнозується подальший щорічний попит ЄС на різноманітні види сировини. Прогнозоване річне споживання матеріалів у батареях електричного транспорту в ЄС до 2030, 2040, 2050 років, разом із поточним попитом (див. табл. 2).

Таблиця 2

Щорічна потреба ЄС у матеріалах для акумуляторів для електромобілів та систем накопичення енергії ESS у 2030, 2040, 2050 роках

матеріали	Co (кобальт)		Li (літій)		Ni (нікель)		Mn (марганець)		C (графіт)	
	в тоннах									
роки	е-мобілі	ESS	е-мобілі	ESS	е-мобілі	ESS	е-мобілі	ESS	е-мобілі	ESS
2030	67000	16000	51000	10000	28000	32000	63000	36000	500000	110000
2040	88500	29000	90000	19000	600000	65000	72000	38500	1100000	190000
2050	110000	44000	130000	28000	1100000	97000	83000	41000	1800000	290000

Джерело: побудовано за результатами авторського моделювання

Акумулятори для систем накопичення енергії (ESS). Energy Storage System (ESS) – це пристрої для зберігання електричної енергії, які використовують акумулятори для зберігання та віддачі електроенергії за потреби. Вони використовуються для зберігання електроенергії, отриманої від різних джерел, таких як сонячна енергія, вітряна енергія та ін. Літій-іонні акумулятори вже широко використовуються в системах накопичення енергії (ESS), і їхні можливості продовжують розширюватися. Ємність акумуляторних батарей в ЄС подана на рис. 5. У табл. 2 наведено прогнозоване річне споживання матеріалів у батареях ESS в ЄС до 2030, 2040, 2050 років.

Технологія акумуляторів на основі літій-іону відзначається вищими характеристиками продуктивності і ефективності у порівнянні з традиційними свинцево-кислотними акумуляторами. Вони стають суттєвою технологією в різноманітних цивільних і військових застосуваннях завдяки своїм перевагам. У зв'язку з розширенням використання електричного транспорту, мобільних пристроїв і стаціонарних систем накопичення енергії ESS, зростає попит на акумулятори. Прогнозується, що попит на літій-іонні акумулятори буде збільшуватись на 30 % щорічно впродовж наступних 10 років.

Технологія «Fuel cells (FCs)», яка поєднує два основні енергоносії майбутнього: електроенергію та водень.

«Fuel cells (FCs)» – це електрохімічні пристрої, що перетворюють хімічну енергію палива на електричну енергію через хімічну реакцію. Вони генерують електрику шляхом поєднання водню та кисню для утворення води, тепла та електрики, де водень зазвичай виступає як основне джерело палива. Цей процес відбувається без згоряння, роблячи паливні елементи чистим та ефективним джерелом енергії, викидаючи лише воду та тепло як продукти. У паливних елементах є різноманітні застосування, включаючи живлення транспортних засобів, надання резервного живлення для будівель та службу як надійний джерело електроенергії в віддалених районах.

На сьогоднішній день існує кілька типів паливних елементів (FCs), які працюють при різних умовах:

– паливні елементи на основі протонного обміну мембраною Polymer Electrolyte Membrane FCs (PEM FCs): використовуються в транспорті та портативних застосуваннях при низькій температурі із протонною обмінною мембраною як електролітом;

– тверді оксидні паливні елементи Solid Oxide FCs (SO FCs): працюють на високих температурах, можуть використовувати природний газ, біопаливо та водень і використовують твердий оксид катода як електроліт;

– метанолові паливні елементи Direct-Methanol FCs (DM FCs): використовують метанол як паливо для портативних пристроїв, не потребуючи зовнішнього реформінгу;

– паливні елементи на основі фосфатної кислоти Phosphoric Acid F (PA FCs);

– лужні паливні елементи Alkaline FCs (A FCs);

– паливні елементи з розплавленими карбонатами Molten Carbonate FCs (MC FCs).

Технологія «Fuel cells (FCs)», використовується у трьох основних сферах: стаціонарна енергетика (67 % ринку), транспорт (32 % ринку) та портативна енергетика (менше 1 % ринку) [4].

На рис. 6 представлений огляд сировинних матеріалів, які використовуються в паливних елементах (FCs). Додатково до цього аналізу розглядалися матеріали та компоненти, пов'язані з виробництвом та зберіганням водню.

Стратегічна сировина


Графіт застосовується як матеріал для виготовлення біполярних пластин.	C	Cu	Мідь використовується у сплавах з нікелем для анодного каталізатора (SO FCs), в проводах і струмопровідних деталях
Стронцій використовується у складі анода (разом з Ti) в SO FCs	Sr	Al	Алюміній використовується для теплового управління блоком паливних елементів і як матеріал опорної плити
Титан використовується для металевої біполярної пластини та в якості анодного складу SO FCs	Ti	Ni	Нікель використовується для покриття біполярних пластин, у складі нержавіючої сталі або як анод
Платина застосовується як найефективніший електрокаталізатор як для катода і анода	Pt		
Кобальт застосовується як каталізатор, що замінює мідь замість платини в паливних елементах PEM FCs	Co		
Паладій використовується як каталізатор, що замінює частину Pt, у вигляді сплаву Pt-Pd	Pd		

Рис. 6. Матеріали, що використовується в паливних елементах (FCs)

Джерело: [4]

З усіх матеріалів, які зараз використовуються для виробництва паливних елементів (FCs) і технологій зберігання водню, кобальт, магній, платина, паладій, борати, металевий кремній, родій, рутеній, графіт, літій, титан і ванадій є критично важливими [4]. Однією з ключових проблем для виробників FCs є висока вартість платини, що становить близько половини вартості самого блоку паливних елементів FCs. Тому науковці постійно звертають увагу на можливості зменшення потреби у платині для виготовлення FCs [8; 9]. На рис. 7 показані ключові країни в логістичній мережі постачання паливних елементів FCs (нижче подано дані щодо світового видобутку у відсотках):

- **Pt** (платина) – Південна Африка (71 %), Росія (16 %) і Зімбабве (6 %);
- **Pd** (паладій), **Rh** (родій), **Ru** (рутеній) – Росія, Південна Африка та Зімбабве.

Основним постачальником сировини, необхідної для технології FCs, є Китай (20 %), за ним ідуть Південна Африка і Росія [4; 5; 6]. Щодо інших матеріалів, таких як вуглець, стабілізований ітрієм цирконій, полімери, композити з вуглецевого волокна, нержавіюча сталь, графен, слюда, порошок нітриду бору, наноматеріали та вуглецеві нанотрубки, вуглецевий папір, ультраміцний поліамід та гідриди металів, то вони відносяться до найбільш актуальних перероблюваних матеріалів для технологій «Fuel cells (FCs)». Наприклад, приблизно 40 % перероблених матеріалів і 25 % компонентів для паливних елементів (FCs) надходять від європейських виробників.

Основними виробниками паливних елементів (FCs) є країни Азії, зокрема Японія та Південна Корея, а також Північна Америка, включаючи Канаду та США.

Розглянувши основних учасників в логістичній мережі постачання паливних елементів (FCs), враховуючи також матеріали для виробництва та зберігання водню. Аналіз критичних етапів вказує на високий потенційний ризик постачання складових частин FCs. Специфічно високий ризик у відношенні до постачання оцінюється для виробництва – початкових матеріалів. Проте для двох інших етапів ланцюга постачання очікуються менші проблеми з постачанням.

Технологія «Fuel cells (FCs)» застосовується як у секторі автомобільної промисловості, так і в системах зберігання енергії, що призводить до потреби у сировинних матеріалах, особливо платині. Попит на платину оцінюється як поточний, оскільки платина складає приблизно 50 % вартості блоку паливних елементів FCs [4; 10; 11]. На рис. 8 показано прогнозований розмір парку електромобілів, що використовують паливні елементи FCs в ЄС, а також прогнозований попит на платину у ЄС в 2030, 2040, 2050 років (див. табл. 3). Цей попит враховує платину, яка використовується в електромобілях на паливних елементах (FCs EV) та в системах зберігання енергії на основі паливних елементів (FCs ESS), виражений у відсотках відносно поточного рівня пропозиції в ЄС. Порівнюючи ці дані, можна побачити, що потреба в платині для FCs ESS значно перевищує необхідність для FCsEV.

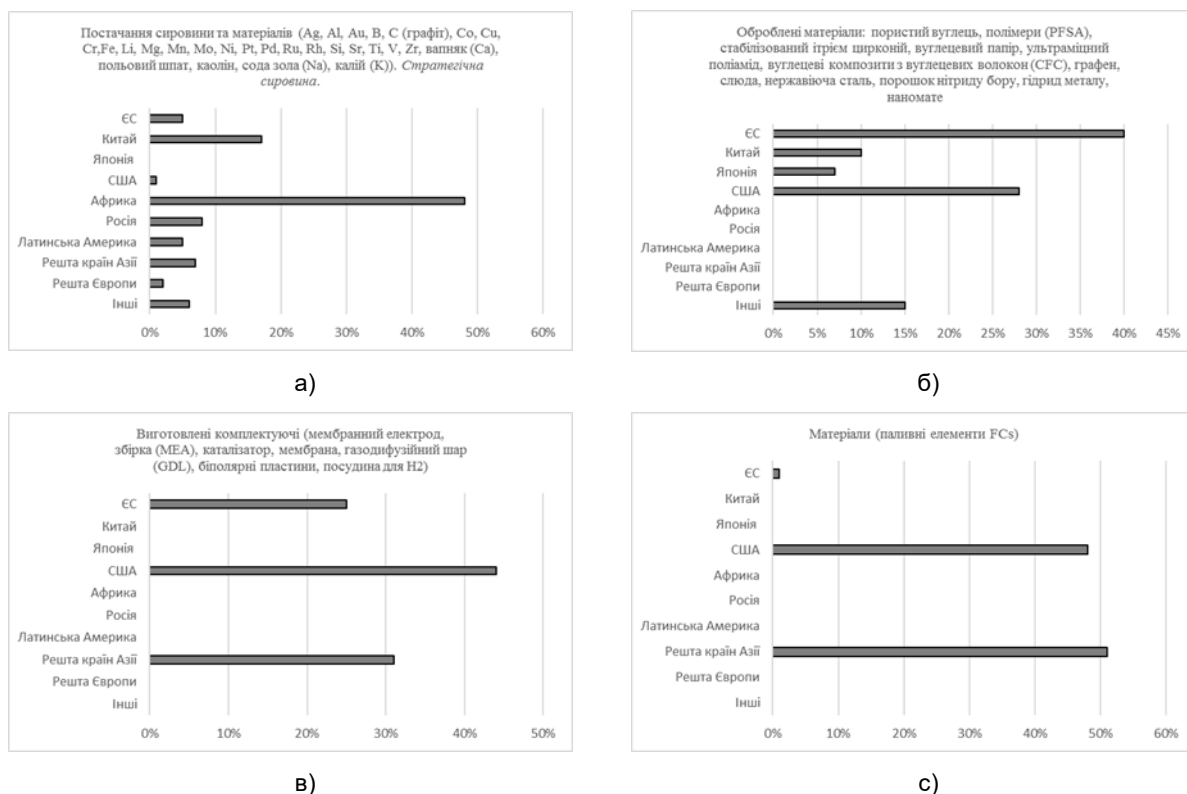


Рис. 7. Ключові країни в логістичній мережі постачання паливних елементів FCs: а) – країни, які постачають критичну сировину для FCs; б) – країни, які виготовляють вузли для FCs; в) – країни, які виготовляють комплектуючі для FCs; г) – країни, які постачають матеріали
 Джерело: [4; 5; 6]

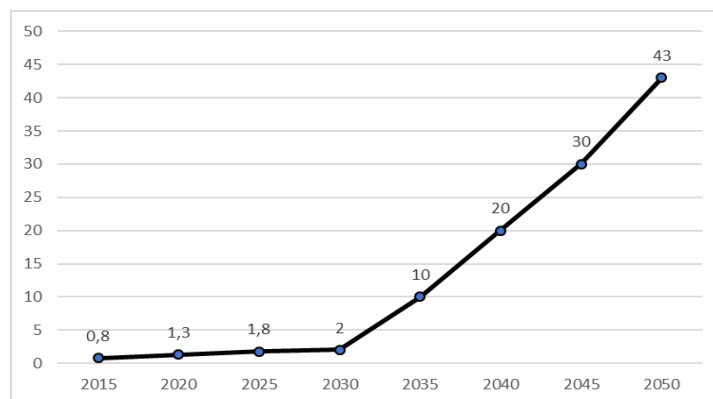


Рис. 8. Парк електромобілів ЄС на паливних елементах FCs (автопарк вимірюється у млн транспортних засобів)

Джерело: побудовано за результатами авторського моделювання

Таблиця 3

Річний попит на Pt (платину) для паливних елементів FCs та електромобілів у 2030, 2040, 2050 роках

роки	матеріали	Pt (платина)	
		в тоннах	
		е-мобілі	FCs
2030		10	0.5
2040		18	1
2050		30	2

Джерело: побудовано за результатами авторського моделювання

Хоча в останні 10 років спостерігалася зростаюча розробка та впровадження паливних елементів FCs, їхнє повне масове комерціалізування залишається невизначеним. Основні проблеми становлять: надійність, доступність, термін служби і вартість цих паливних елементів FCs.

Двигуни (на постійних магнітах) – це електричні двигуни, які використовують магніти з постійною магнітною полярністю для створення магнітного поля, яке викликає рух ротора. Ці типи двигунів відрізняються високою енергоефективністю, малим рівнем шуму, низькими втратами та довговічністю. Вони широко використовуються в електроніці, промисловості, транспорті та інших галузях, де потрібен високий крутний момент і енергоефективність.

На сьогоднішній день в ЄС налічується близько 8 мільярдів електродвигунів, які витрачають майже половину виробленої електроенергії в ЄС. Очікується значний зріст кількості двигунів у майбутньому, особливо через широке використання електродвигунів у електромобілях. Ці електродвигуни для електромобілів потребують високих технічних показників, таких як великий крутний момент, легкість та збільшення ККД. Найбільш поширеними є синхронні двигуни з постійними магнітами та асинхронні двигуни:

– синхронні двигуни з магнітами NdFeB є ключем до збільшення потужності та ефективності. Це підвищує їх продуктивність та дальність ходу, роблячи автомобілі, де вони використовуються, більш конкурентоспроможними на ринку. Сплави NdFeB містять рідкоземельні матеріали, такі як неодим, празеодим і диспрозій, і вважаються найсильнішими магнітами з найбільшою часткою продажів [12; 13];

– асинхронні двигуни, відомі також як індукційні, є універсальними електричними двигунами, які широко застосовуються в різних галузях, зокрема, у машинних приводах, вентиляційних системах, насосах, транспорті та інших сферах завдяки їхній простоті конструкції та доступній вартості виробництва. Асинхронні двигуни не потребують окремого живлення для ротора та працюють на принципі індукції струму у витках статора. Ці двигуни містять більше міді, а також значну кількість неблагородних металів, таких як сталь (електротехнічна сталь може містити до 6,5 % кремнію), мідь та алюміній [14].

Очікується, що в майбутньому технологія магнітів NdFeB буде домінувати на ринку. Прогнозується, що до 2025 року від 90 % до 100 % гібридних автомобілів та 100 % електромобілів можуть базуватися на синхронних двигунах з NdFeB-магнітами [15]. Також проводяться дослідження заміни рідкоземельних магнітів іншими матеріалами. Наприклад, «дешеві магніти», які виготовлені з феритів (оксид заліза в поєднанні з металами стронцієм, барієм або кобальтом) або алюміній-нікель-кобальт (AlNiCo), розглядаються як альтернатива, хоча їм потрібно значно покращити їх коерцитивну силу. Магніти на основі самарію та кобальту (SmCo), які були розроблені у 1970-х і часто застосовуються в аерокосмічній сфері, цікаві тим, що вони можуть переносити вищі температури, порівняно з NdFeB. Однак на сьогодні вони вважаються досить вартісними. На рис. 9 представлений огляд сировинних матеріалів, які використовуються у електричних двигунах.

Стратегічна сировина

Неодим використовується у постійних магнітах NdFeB, магніти в роторі двигуна для забезпечення сильного магнітного поля

Nd

Cu

Мідь широко використовується в генераторних обмотках, кабелях, інверторах, в управлінні систем

Празеодим використовується разом з неодимом у постійних магнітах

Pr

Al

Алюміній використовується в корпусах і як легкий матеріал в інших металевих деталях

Диспрозій застосовується як важлива добавка до неодим-залізо-бор (NdFeB) у постійні магніти

Dy

Mo

Молібден використовується у складі нержавіючої сталі та сплавів для корпусів електродвигунів і валів електродвигунів

Кремній застосовується для електроніки в напівпровідниках, керуючій електроніці, як легуючий елемент в Al-сплавах та кремнієвій сталі

Si

Cr

Хром використовується у складі нержавіючої сталі та сплавів, стійких до корозії в різних компонентах двигуна

Бор застосовується у складі неодим-залізо-бор (NdFeB) магнітів

B

Fe

Залізо: чавун або сталь композиція для корпусів і в NdFeB магнітах

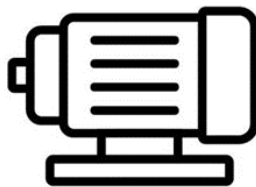


Рис. 9. Матеріали, які використовуються у електричних двигунах

Джерело: [4]

У сучасних електричних двигунах такі матеріали, як бор, диспрозій, неодим і празеодим є критично важливими матеріалами. На рис. 10 зображено ключові країни у логістичних мережах постачання

сировини для цих двигунів. З графіків видно, що зараз Китай переважає у виробництві магнітів NdFeB, тоді як інша частина цих магнітів виготовляється в Японії, ЄС та США. Останнім часом виробництво магнітів NdFeB продовжує зміщуватися до Китаю, де доступ до ресурсів залишається найбільш доступним і дешевшим. Крім того, електротехнічна сталь з особливими магнітними властивостями є основним компонентом кожного електродвигуна сьогодення. Виробництво цієї сталі рівномірно розподілене по всьому світу, зокрема в Азії, США та ЄС. Зібрані електродвигуни на сьогоднішній день переважно виготовляються азійськими компаніями, особливо в Японії [8]. Загалом, для постачання сировини визначено високий рівень ризику, в той час як середній рівень ризику оцінюється для постачання перероблених матеріалів та комплектуючих [4; 5; 6].

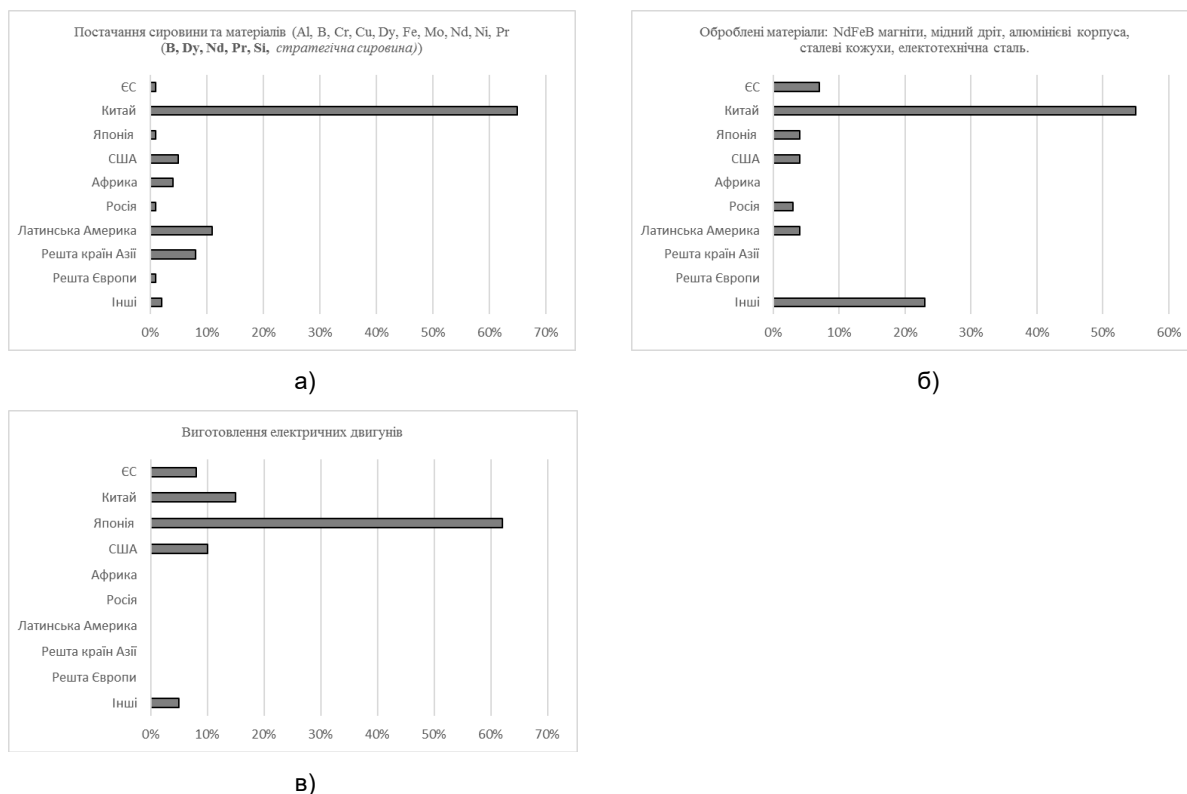


Рис. 10. Ключові країни в логістичній мережі постачання сировини до електричних двигунів: а) – країни, які постачають критичну сировину та матеріали; б) – країни, які виготовляють вузли; в) – країни, які виготовляють електричні двигуни

Джерело: [4; 7; 8; 16; 17]

Можливо визначити обсяг електродвигунів, які були випущені на ринок, та визначити річний попит ЄС на різні матеріали, використовувані у електричних двигунах, зважаючи на очікуваний обсяг транспортних засобів [13; 14; 18].

Прогнозовані обсяги споживання сировини для електричних двигунів вказують на основні періоди підвищеного попиту на борати та РЗЕ (див. табл. 4). Наприклад, прогнозується збільшення річного споживання неодиму в ЄС для електродвигунів у 2050 році в 12 разів, досягаючи таким чином поточного рівня споживання неодиму в ЄС для всіх галузей застосування. Подібно зростатиме й попит на борати, проте це може мати менші наслідки для технологій, оскільки ринкова доступність у багатьох інших сферах застосування вища, а тому ймовірність проблеми через їхню концентрацію на ринку менша.

На рис. 11 показано прогнозований розмір парку транспортних засобів з електричними двигунами. Ці прогнози зафіксовані відносно електромобілів і не враховують важливості електровелосипедів. Електричні двигуни з асинхронними системами широко використовуються в е-велосипедах через їх легкість та компактність. Ринок електровелосипедів показує значний зріст за останні роки по всьому світу, і ймовірно, ця тенденція продовжиться і в наступному десятилітті.

Електричні приводи для транспортних засобів та важкого транспорту зараз є рушійною силою розвитку ринку електродвигунів; компактні розміри та продуктивність постійних магнітів роблять їх найпопулярнішою технологією тягових двигунів. Для тягових двигунів найбільше занепокоєння викликають ризики постачання, пов'язані з РЗЕ в постійних магнітах. Це також стосується виробництва постійних магнітів, яке все більше концентрується в Китаї. Це викликає особливе занепокоєння оскільки

очікується, що в майбутньому технологія постійних магнітів буде домінувати на ринку, що вибухає, і буде визначальною для конструкції двигунів (а, отже, і транспортних засобів).

Таблиця 4

Щорічна потреба ЄС у матеріалах для електричних двигунів у 2030, 2040, 2050 роках

матеріали роки	Al (алюміній)	борати	Cu (мідь)	Dy (диспрозій)	Nd (неодим)	Pr (празеодим)	Si (кремній)	Fe (сталь)
	в тоннах							млн тонн
2030	130000	120	83000	410	1300	430	45000	910
2040	275000	240	171600	755	2400	760	91000	1805
2050	420000	360	260000	1100	3300	1100	140000	2900

Джерело: побудовано за результатами авторського моделювання

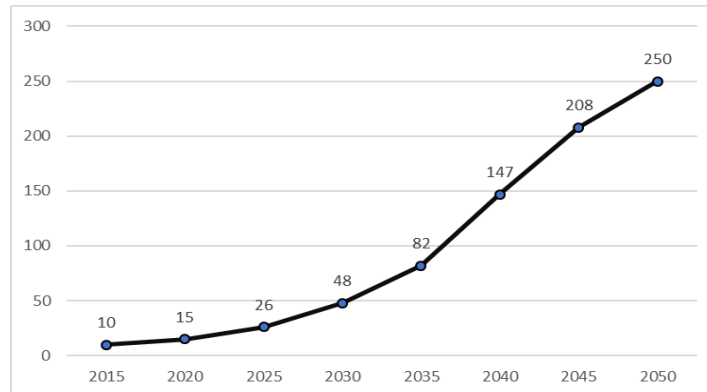


Рис. 11. Парк транспортних засобів з електричними двигунами (автопарк вимірюється у млн транспортних засобів)

Джерело: побудовано за результатами авторського моделювання

Отже, у нашому дослідженні ми розглянули використання рідкоземельних елементів в трьох передових технологіях, які тісно пов'язані з автомобільною галуззю, проаналізували їхнє постачання та зробили прогноз розвитку ринку цих елементів у сучасних умовах, на ринку ЄС.

Оцінювання ринку ЄС ґрунтується на економічній значущості та ризиках поставок. Економічна значущість досліджує, як розподіляється сировина між кінцевими споживачами відповідно до її використання. Ризик постачання аналізує концентрацію виробництва сировини на рівні країни та її доставку до ЄС з урахуванням, екологічного фактору, переробка вторинної сировини, заміщення, залежність від імпорту.

Багато критично важливих рідкоземельних елементів концентруються у певних країнах: Китай постачає 98 % рідкоземельних елементів, Туреччина – 98 % боратів, а Південна Африка забезпечує 71 % потреб ЄС у платині та інших металах платинової групи, таких як іридій, родій і рутеній, гафній та стронцій постачається з ЄС [19].

У майбутньому, для акумуляторів електромобілів та систем зберігання енергії, очікується значне збільшення потреби ринку ЄС у літій (до 16 разів більше до 2030 року та до 50 разів більше до 2040 року) і кобальту (в 4 рази більше до 2030 року та в 12 разів більше до 2040 року) у порівнянні з поточним обсягом постачання для всієї економіки ЄС. Цей зростаючий попит може призвести до проблем з постачанням. Також передбачається, що попит на рідкоземельні елементи, які використовуються у постійних магнітах, таких як електромобілі, зросте в десять разів до 2040 року.

Світовий банк прогнозує стрімке збільшення попиту на метали та мінерали, особливо це стосується електричних акумуляторних батарей. Попит на відповідні метали, такі як алюміній, кобальт, залізо, свинець, літій, марганець і нікель, за сценарієм підвищення температури на 2°C до 2050 року, очікується зростати більш ніж у 10 разів у порівнянні зі сценарієм «звичайного розвитку». Організація економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) передбачає, що, незважаючи на покращення показників матеріаломісткості, ресурсоемності та зростання частки послуг у економіці, використання матеріалів збільшиться практично вдвічі – з рівня 79 мільярдів тонн у 2011 році до 167 мільярдів тонн у 2060 році (+110 %) [19].

Протягом останнього десятиліття виробники рідкоземельних елементів стратегічно надмірно виробляли низько вартісні рідкоземельні елементи, такі як церій, щоб задовольнити зростаючий попит на цінніші елементи, зокрема неодим. Прогнозується, що постійно зростаючий попит на рідкоземельні постійні магніти призведе до значного збільшення світового попиту на оксид неодиму. Це може поглибити дисбаланс між виробництвом та попитом на інші РЗЕ, такі як оксид церію, якщо промисловість буде продовжувати використовувати традиційні підходи у веденні бізнесу. Це, своєю чергою, може

привести до збільшення цін на постійні магніти протягом наступного десятиліття, що негативно вплине на автомобільну промисловість.

У останні роки відбувається зменшення частки Китаю у видобутку РЗЕ через відкриття нових родовищ по всьому світу. Тим не менше, зросла участь Китаю у переробці руд РЗЕ, що дозволяє їх конвертувати у оксиди, метали, сплави та магніти, попит на які постійно зростає. Цей сектор переробки приносить більший прибуток і є більш екологічно чистим з екологічної точки зору.

Виробнику, який планує в найближчі роки відкрити новий родовище рідкоземельних елементів поза межами Китаю (наприклад, в Гренландії, Україні або іншому місці), великою ймовірністю є те, що продукція з цієї шахти буде включена у ланцюжок створення вартості в Китаї.

Доки інші країни не розпочнуть інвестування у важливі етапи переробки рідкоземельних руд, тобто у виробництво матеріалів, що мають попит, наприклад, NdFeB магнітів, кінцеві користувачі за межами Китаю залишатимуться вразливими до китайської монополії і залежними від неї у майбутньому, незалежно від того, скільки нових шахт запустять в інших країнах [20].

З цього випливають наступні рекомендації з деякими зауваженнями:

– удосконалити виробничі процеси, спрямовані на збільшення видобутку та обробку ключових сировинних та перероблених матеріалів;

– організувати складання основних компонентів для зменшення потреби в азійських постачаннях;

– організувати покращення надійності і зниження витрат через наукові дослідження та розробки, спрямовані на зменшення потреби в платині для каталізаторів паливних елементів;

– удосконалити переробку, використання альтернативних матеріалів: це дає змогу відновлювати та використовувати матеріали, такі як кобальт, літій, марганець і нікель, у виробництві нових акумуляторів;

– розширити джерел постачання матеріалів: укладання торговельних угод з країнами-постачальниками та використання економічної дипломатії для кобальту, літію, природного графіту та нікелю першого класу, з метою зменшення ризиків у постачанні;

– сприяти інвестиціям у новітні технології та розвивати навички та компетенції: продовження досліджень у напрямку впровадження інноваційних, економічно ефективних методів обробки, розділення та переробки рідкоземельних елементів може збільшити надійність у постачанні. Також варто провести подальші дослідження з використанням альтернативних матеріалів та більш доступних «дешевих магнітів».

На сьогоднішній день наша країна представлена лише видобутком та постачанням рідкоземельних елементів на ринку. На державному балансі корисних копалин зареєстровано 24 родовища з покладами стратегічних ресурсів, включаючи рідкоземельні корисні копалини. Більшість руд в Україні є бідними і важко підходять для експлуатації. Більшість родовищ перебувають на стадії техніко-економічного обґрунтування, за винятком українського проекту компанії «Укрлітій», який розробляє Полохівське родовище. Роботи з цим проектом перебувають на стадії геолого-економічного обґрунтування [21]. В табл. 5 наведені рідкісні та рідкоземельні елементи України.

Таблиця 5

Рідкісні та рідкоземельні елементи України

Корисні копалини		Балансові запаси, тис.тонн	Кількість родовищ
Be	руди берилію	2065,9	1
	оксид берилію	11,441	
V	руди ванадію	15,5	13
Li	руди літію		3
Sr	руди стронцію	859627	1
	оксид стронцію	0,865	
Ta Nb	руди танталу і		1
	ніобію		4
Zr	руди цирконію		2
ітрієві лантаноїди (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)	руди рідкоземельні	860524	1
	TR203	1939,7	2
Sc	руди скандію		13

Джерело: [22]

Військова агресія РФ та тимчасова окупація частини території України мали негативний вплив на забезпечення стратегічними мінеральними ресурсами галузей української економіки. Приблизно 700 родовищ, які мали ліцензії на розробку, було втрачено, з них 450 (22 %) становили родовища з важливою сировиною [21]. На тимчасово окупованих територіях незаконно видобувається багато корисних копалин, які потім вивозять до РФ. Крім того, бомбардування важливої інфраструктури, зокре-

ма енергетичних об'єктів, спричиняє зупинку промислових підприємств, включаючи гірничі комплекси. Це може призвести до непоправних змін у становищі кар'єрів та шахт, що ускладнить або навіть припинить подальший видобуток корисних копалин. Ця обстановка призводить до значних втрат у внутрішній мінерально-сировинній базі та не залучає інвесторів, що має негативний вплив на економіку країни.

Висновки з проведеного дослідження. Літій, кобальт, неодим і графіт та інші елементи стають все більш важливими у сучасній автомобільній промисловості, технологіях та повсякденному житті, що призводить до збільшення попиту на ці рідкоземельні елементи. В майбутньому попит на них буде зростати внаслідок розвитку зелених технологій та високотехнологічних пристроїв. Рідкоземельні елементи вважаються критичними через можливий дефіцит, обмеження постачання та відсутність локальних зосереджень для видобутку. На світовому ринку РЗЕ переважно китайське виробництво оксидів цих елементів. Саме тому важливо розглядати альтернативні джерела і сучасні технології переробки для задоволення попиту і забезпечення подальшого виробництва рідкоземельних елементів.

Література

1. Мірошніченко Б. Бій за таблицю Менделєєва: як США та Китай борються за рідкісні метали. *Економічна правда*. 2022. 03.02. URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2022/02/3/682031/> (дата звернення: 21.12.2023).
2. Гулай О., Шемет В., Фурс Т. Рідкоземельні метали як критична сировина. Короткий огляд. *Праці НТШ: Хімічні науки*. 2022. Т. LXX. С. 79–89.
3. Trade in rare earth elements increases in 2022. *Eurostat*. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/w/ddn-20231113-1?language=uk&ettrans=uk> (дата звернення: 21.12.2023).
4. Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU. *European Commission*. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e167f11-077c-11eb-a511-01aa75ed71a1/language-en> (дата звернення: 21.12.2023).
5. The European Green Deal, COM(2019) 640 final. *European Commission*. 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640&qid=1706196959898> (дата звернення: 21.12.2023).
6. Jose Lazuen, Robert Baylis, David Merriman, Márcio Goto. Lithium, Batteries and xEVs – Roskill's views of international markets and prices. 2018. URL: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/eventos/2018/iii-litio-brasil/apresentacoes/lithium-batteries-xevs.pdf> (дата звернення: 21.12.2023).
7. Materials dependencies for dual-use technologies relevant to Europe's defence sector / Blagoeva D., Pavel C., Wittmer D., Huisman J., Pasimeni F. EUR 29850 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC117729> (дата звернення: 21.12.2023).
8. Communication "Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability", COM(2020) 474 final. *European Commission*. 2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474> (дата звернення: 21.12.2023).
9. Hao H. et al. Securing Platinum-Group Metals for Transport Low-Carbon Transition. *One Earth*. 2019. Vol. 1. № 1. P. 117–125.
10. Manberger A., Stenqvist B. Global Metal Flows in the Renewable Energy Transition: Exploring the Effects of Substitutes, Technological Mix and Development. *Energy Policy*. 2018. Vol. 119. № April. P. 226–241.
11. Sun Y., Delucchi M., Ogden J. The Impact of Widespread Deployment of Fuel Cell Vehicles on Platinum Demand and Price. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36. № 17. August 1. P. 11116–11127.
12. Pavel C. et al. Role of Substitution in Mitigating the Supply Pressure of Rare Earths in Electric Road Transport Applications. *Sustainable Materials and Technologies*. 2017. Vol. 12. P. 62–72.
13. Materials Impact on the EU's Competitiveness of the Renewable Energy, Storage and e-Mobility Sectors – Wind Power, Solar Photovoltaic and Battery Technologies / Pavel C., Blagoeva D. EUR 28774 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017.
14. Hernandez M. et al. Environmental Impact of Traction Electric Motors for Electric Vehicles Applications. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017. Vol. 22. № 1. P. 54–65.
15. Leader A., Gaustad G. Critical Material Applications and Intensities in Clean Energy Technologies. *Clean Technologies*. 2019. Vol. 2. № 1. P. 11–31.
16. Razdan P., Garrett P. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V112-3.45MW Wind Plant. *Vestas Wind Systems*. 2017.
17. The Future of Road Transport – Implications of Automated, Connected, Low-Carbon and Shared Mobility / Alonso Raposo M., Ciuffo B., Ardente F., Aurambout J.P., Baldini G., Braun R., Christidis P., et al.

- Joint Research Centre. JRC116644, 2019. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116644> (дата звернення: 21.12.2023).
18. Assessment of Potential Bottlenecks along the Materials Supply Chain for the Future Deployment of Low-Carbon Energy and Transport Technologies in the EU. Wind Power, Photovoltaic and Electric Vehicles Technologies Time Frame: 2015-2030 / Blagoeva D.T., Aves Dias P., Marmier A., Pavel C. Joint Research Centre. JRC103778, 2016. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC103778> (дата звернення: 21.12.2023).
19. European Commission, Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability, COM(2020) 474 final, 2020 URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474> (дата звернення: 21.12.2023).
20. Rare Earths Market Issues and Outlook. Adamas Intelligence. Q2-2019. URL: <https://www.adamasintel.com/wp-content/uploads/2019/07/Adamas-Intelligence-Rare-Earths-Market-Issues-and-Outlook-Q2-2019.pdf> (дата звернення: 21.12.2023).
21. Шехунова С. Б. Критична та стратегічна мінеральна сировина для економічної безпеки та повоєнного розвитку України. *Вісник Національної академії наук України*. 2023. № 5. С. 25-30.
22. Карта родовищ рідкісних та рідкоземельних металів. УКРАЇНСЬКА ENERGETИКА. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/karta-rodovyshch-ridkisnykh-ta-ridkozemelnykh-metaliv> (дата звернення: 21.12.2023).

References

- Miroshnychenko, B. (2022), "The Battle for the Periodic Table: How the United States and China Fight for Rare Metals", *Ekonomichna pravda*, 03.02, available at: <https://www.epravda.com.ua/publications/2022/02/3/682031/> (access date December 21, 2023).
- Hulai, O., Shemet, V. and Furs, T. (2022), "Rare earth metals as critical raw materials. A brief review", *Pratsi NTSh: Khimichni nauky*, Vol. LXX, pp. 79–89.
- Eurostat (2022), Trade in rare earth elements increases in 2022, available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/w/ddn-20231113-1?language=uk&etrans=uk> (access date December 21, 2023).
- European Commission (2023), Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU, available at: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e167f11-077c-11eb-a511-01aa75ed71a1/language-en> (access date December 21, 2023).
- European Commission (2019), The European Green Deal, COM (2019) 640 final, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640&qid=1706196959898> (access date December 21, 2023).
- Lazuen, Jose, Baylis, Robert, Merriman, David and Goto, Márcio (2018), "Lithium, Batteries and xEVs – Roskill's views of international markets and prices", available at: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/eventos/2018/iii-litio-brasil/apresentacoes/lithium-batteries-xevs.pdf> (access date December 21, 2023).
- Blagoeva, D., Pavel, C., Wittmer, D. et al. (2019), "Materials dependencies for dual-use technologies relevant to Europe's defence sector", EUR 29850 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC117729> (access date December 21, 2023).
- European Commission (2020), Communication "Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability", COM(2020) 474 final, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474> (access date December 21, 2023).
- Hao, H. et al (2019), "Securing Platinum-Group Metals for Transport Low-Carbon Transition", *One Earth*, Vol. 1, no. 1, pp. 117–125.
- Manberger, A. and Stenqvist, B. (2018), "Global Metal Flows in the Renewable Energy Transition: Exploring the Effects of Substitutes, Technological Mix and Development", *Energy Policy*, Vol. 119, no. April, pp. 226–241.
- Sun, Y., Delucchi, M. and Ogden, J. (2011), "The Impact of Widespread Deployment of Fuel Cell Vehicles on Platinum Demand and Price", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, no. 17, August 1, pp. 11116–11127.
- Pavel, C. et al. (2017), "Role of Substitution in Mitigating the Supply Pressure of Rare Earths in Electric Road Transport Applications", *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 12, pp. 62–72.
- Pavel, C. and Blagoeva, D. (2017), Materials Impact on the EU's Competitiveness of the Renewable Energy, Storage and e-Mobility Sectors – Wind Power, Solar Photovoltaic and Battery Technologies / EUR 28774 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Hernandez, M. et al. (2017), "Environmental Impact of Traction Electric Motors for Electric Vehicles Applications", *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22, no. 1, pp. 54–65.

15. Leader, A. and Gaustad, G. (2019), "Critical Material Applications and Intensities in Clean Energy Technologies", *Clean Technologies*, Vol. 2, no. 1, pp. 11–31.
16. Razdan, P. and Garrett, P. (2017), Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V112-3.45MW Wind Plant. *Vestas Wind Systems*.
17. Alonso, Raposo M., Ciuffo, B., Ardente, F., Aurambout, J.P., Baldini, G., Braun, R. and Christidis, P. et al. (2019), The Future of Road Transport – Implications of Automated, Connected, Low-Carbon and Shared Mobility / Joint Research Centre. JRC116644, available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116644> (access date December 21, 2023).
18. Blagoeva, D.T., Aves, Dias P., Marmier, A. and Pavel, C. (2016), Assessment of Potential Bottlenecks along the Materials Supply Chain for the Future Deployment of Low-Carbon Energy and Transport Technologies in the EU. Wind Power, Photovoltaic and Electric Vehicles Technologies Time Frame: 2015-2030, Joint Research Centre. JRC103778, available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC103778> (access date December 21, 2023).
19. European Commission (2020), Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability, COM (2020) 474 final, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474> (access date December 21, 2023).
20. Rare Earths Market Issues and Outlook. Adamas Intelligence. Q2-2019, available at: <https://www.adamasintel.com/wp-content/uploads/2019/07/Adamas-Intelligence-Rare-Earths-Market-Issues-and-Outlook-Q2-2019.pdf> (access date December 21, 2023).
21. Shekhunova, S.B. (2023), "Critical and strategic mineral raw materials for economic security and post-war development of Ukraine", *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, no. 5, pp. 25-30.
22. Map of rare and rare earth metal deposits. UKRAЇНСЬКА ENERGETИКА. available at: <https://ua-energy.org/uk/posts/karta-rodovyshch-ridkisnykh-ta-ridkozemelnykh-metaliv> (access date December 21, 2023).

Новосад І.Я., Руська Р.В., Пласкоть С.А.

РІДКОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ: КЛЮЧОВІ КОМПОНЕНТИ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Мета. Провести комплексний аналіз шляхів постачання рідкоземельних елементів та спрогнозувати розвиток ринку цих елементів у сучасних умовах, що виникають внаслідок війни та інших чинників.

Методика дослідження. У процесі написання статті було використано методику наукового дослідження для визначення узагальнюючих зведених синтетичних показників щодо стратегічних шляхів розвитку та диверсифікації постачання рідкоземельних елементів, а також статистичний та графічний методи для аналізу ринку рідкоземельних елементів та прогнозування попиту та пропозиції за допомогою часових рядів. Графіки були використані для візуалізації цих даних.

Результати дослідження. Встановлено, що літій, кобальт, неодим та графіт, а також інші елементи, стають все більш важливими у сучасних технологіях та повсякденному житті, що призводить до збільшення попиту на ці рідкоземельні елементи. Проаналізовано ринок рідкоземельних елементів та прогнозовано попит, який в майбутньому буде зростати внаслідок розвитку зелених технологій та високотехнологічних пристроїв. Досліджено шляхи розвитку та диверсифікації постачання рідкоземельних елементів, що дало можливість вважати їх критичними через можливий дефіцит, обмеження постачання та відсутність локальних зосереджень для видобутку. На світовому ринку РЗЕ переважно китайське виробництво оксидів цих елементів. Саме тому наведені шляхи уникнення потенційних ризиків у постачанні рідкоземельних матеріалів важливо розглядати альтернативні джерела та сучасні технології переробки для задоволення попиту і забезпечення подальшого виробництва рідкоземельних елементів.

Наукова новизна результатів дослідження. У статті проаналізовано шляхи постачання рідкоземельних елементів та їх важливу роль у сучасних технологіях. Виконано прогноз, з проведеним аналізом ринку рідкоземельних матеріалів, який зростатиме у зв'язку з переходом до кліматично нейтральної економіки.

Робота набуває актуальності, оскільки вперше здійснено аналіз у комплексному використанні рідкоземельних елементів у таких технологіях, як акумуляторна технологія на основі літій-іону, технологія «Fuel cells (FCs)» та двигуни (на постійних магнітах), і виявлено потенційні ризики в постачанні рідкоземельних матеріалів, а також наведені шляхи їх уникнення.

Практична значущість результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані для аналізу і прогнозування шляхів постачання рідкоземельних матеріалів, а також вирішення питань щодо майбутніх викликів та розвитку конкуренції за ресурси.

Ключові слова: рідкоземельні елементи (РЗЕ), критично важливий матеріал, акумуляторна технологія на основі літій-іону, технологія «Fuel cells (FCs)», двигуни (на постійних магнітах), статистичний метод, прогнозування.

Novosad I.Ya., Ruska R.V., Plaskon S.A.

RARE EARTH METALS: KEY COMPONENTS OF MODERN TECHNOLOGIES

Purpose. The aim of the article is to conduct a comprehensive analysis of the supply routes for rare earth elements and forecast the development of the market for these elements in the current conditions arising from the war and other factors.

Methodology of research. The scientific research methodology was used in the process of writing the article to determine generalised synthetic indicators on strategic ways of development and diversification of rare earth elements supply, as well as statistical and graphical methods to analyse the rare earth elements market and forecast supply and demand using time series. Graphs were used to visualise this data.

Findings. It has been found that lithium, cobalt, neodymium and graphite, as well as other elements, are becoming increasingly important in modern technologies and everyday life, which leads to an increase in demand for these rare earth elements. The market for rare earth elements is analysed and demand is forecasted to grow in the future due to the development of green technologies and high-tech devices. The ways of developing and diversifying the supply of rare earth elements are investigated, which made it possible to consider them critical due to possible shortages, supply restrictions and the lack of local concentrations for mining. The global REE market is dominated by Chinese production of REE oxides. That is why, in order to avoid potential risks in the supply of rare earth materials, it is important to consider alternative sources and modern processing technologies to meet demand and ensure further production of rare earth elements.

Originality. The article analyses the ways of supplying rare earth elements and their important role in modern technologies. A forecast is made, with an analysis of the market for rare earth materials, which will grow in connection with the transition to a climate-neutral economy.

The work is relevant because it is the first to analyse the integrated use of rare earth elements in technologies such as lithium-ion battery technology, fuel cell (FCs) technology and permanent magnet motors. Potential risks in the supply of rare earth materials were determined and ways to avoid them were proposed.

Practical value. The practical significance of this research is that in the 20th century, rare earth elements became a key to the production of electronics and other technologies. China, which has significant REE resources, controls a large share of global production, which leads to geopolitical tensions in the supply sector. The results of the study can be used to analyse and forecast the ways of supplying rare earth materials, as well as to solve issues related to future challenges and the development of competition for resources.

Key words: rare earth elements (REEs); critical material; lithium-ion battery technology; Fuel cells (FCs) technology; permanent magnet motors; statistical method; forecasting.