

Розділ 7. Підприємництво, торгівля та біржова діяльність

УДК 330.15

DOI: 10.31732/2663-2209-2021-63-140-154

НОВІ ВИКЛИКИ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ БЕЗПЕЦІ: ПОПИТ НА КРИТИЧНІ МІНЕРАЛИ ПІД ЧАС ПЕРЕХОДУ ДО «ЧИСТОЇ» ЕНЕРГЕТИКИ

Бобров Є.А.

д.е.н., доцент, професор кафедра національної економіки та фінансів, ВНЗ «Університет економіки та права «КРОК», м. Київ, Україна, e-mail: EvgeniyBA@krok.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7397-3132>

NEW CHALLENGES TO ENERGY SECURITY: DEMAND FOR CRITICAL MINERALS DURING THE TRANSITION TO "CLEAN" ENERGY

Bobrov Yevhenii

Doctor of sciences (Economics), associate professor, professor of national economy and finance department, «KROK» University, Kyiv, Ukraine, e-mail: EvgeniyBA@krok.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7397-3132>

Анотація. Енергетика, яка працює на основі технологій «чистої» енергії, суттєво відрізняється від енергетики, яка використовує традиційні вуглеводневі ресурси. Будівництво сонячних електростанцій, вітроелектростанцій та електричних транспортних засобів потребує більше мінералів, ніж їх аналоги, які використовують викопне паливо. З 2010 року разом із зростанням використання відновлювальних джерел енергії середня кількість корисних копалин, необхідних для нової одиниці встановленої потужності з виробництва електроенергії, зросла на 50 %. Поступовий перехід до «чистої» енергетики повинен призвести до значного збільшення потреби на мінеральні ресурси, тобто енергетичний сектор стає рушійною силою на ринках корисних копалин. До середини 2010-х років енергетичний сектор формував незначну частину загального обсягу попиту на більшість корисних копалин. Проте, коли енергетичний перехід почав набирати темп, технології «чистої» енергії стали найбільш швидкозростаючим сегментом формування попиту. У сценарії, який відповідає цілям Паризької угоди, частка технологій «чистої» енергії у загальному попиті значно зростає протягом наступних двох десятиліть. Розвинені країни прискорюють свої зусилля щодо скорочення викидів, разом з цим їм необхідно бути переконаними, що їх енергетичні системи залишаються стійкими та безпечними. Сучасні міжнародні механізми енергетичної безпеки розроблені для того, щоб забезпечити страхування від ризиків збоїв або стрибків цін поставки вуглеводнів, особливо нафти. Декарбонізація енергетики вимагає від тих, хто формує енергетичну політику, звернути свою увагу на нові потенційно вразливі позиції енергетичної безпеки, зокрема забезпечення критичними мінеральними ресурсами. Метою даної статті є звернути увагу на значення критичних мінералів та їх роль в переході до «чистої» енергетики. В роботі використано методи аналізу й синтезу, порівняльного аналізу та системного підходу. Матеріалами слугували наукові доповіді міжнародних організацій, приватних і публічних компаній, публікації зарубіжних, присвячені зазначеній проблематиці. Тому занепокоєння щодо нестабільності цін та безпеки постачання зростають в розвинених країнах, енергетичні системи яких мають значну частку відновлювальних джерел енергії.

Ключові слова: енергетика, енергетична безпека, «чиста» енергетика, мінеральні ресурси, прогноз.

Формули: 0; рис.: 2; табл.: 5, бібл.: 14

Annotation. Energy industry based on "clean" energy technologies is significantly different from energy industry that uses traditional hydrocarbon resources. The construction of solar power plants, wind farms and electric vehicles requires more minerals than their fossil fuel counterparts. Since 2010, along with the growth in the use of renewable energy sources, the average amount of minerals required for a new unit of installed capacity for electricity production has increased by 50%. The gradual transition to "clean" energy should lead to a significant increase in the need for mineral resources, i.e. the energy sector is becoming a driving force in the mineral markets. By the mid-2010s, the energy sector accounted for a small share of total demand for most minerals. However, as the energy transition began to gain momentum, "clean" energy technology became the fastest growing segment of demand. In a scenario that meets the goals of the Paris Agreement, the share of clean energy technologies in total demand will increase significantly over the next two decades. Developed countries are stepping up their efforts to reduce emissions, but they also need to make sure that their energy systems remain sustainable and secure. Modern international energy security mechanisms are

designed to insure against the risks of disruptions or spikes in the supply of hydrocarbons, especially oil. The decarbonisation of energy requires those who shape energy policy to pay attention to new potentially vulnerable positions in energy security, including the provision of critical mineral resources. The purpose of this article is to draw attention to the importance of critical minerals and their role in the transition to "clean" energy. The methods of analysis and synthesis, comparative analysis and system approach are used in the work. The materials were scientific reports of international organizations, private and public companies, foreign publications on this issue. Therefore, concerns about price volatility and security of supply are growing in developed countries, whose energy systems have a significant share of renewable energy sources.

Keywords: energy, energy security, "clean" energy, mineral resources, forecast.

Formulas:0; fig.: 2; tabl.: 5; bibl.: 14

Постановка проблеми. Енергетика, яка працює на основі технологій «чистої» енергії, суттєво відрізняється від енергетики, яка використовує традиційні вуглеводневі ресурси. Будівництво сонячних електростанцій, вітроелектростанцій та електричних транспортних засобів потребує більше мінералів, ніж їх аналоги, які використовують викопне паливо. Типовий електричний автомобіль вимагає в шість разів більше мінеральних корисних копалин у порівнянні із звичайним автомобілем, берегова вітроелектростанція вимагає в дев'ять разів більше мінеральних ресурсів, ніж газова електростанція такої ж потужності. З 2010 року разом із зростанням використання відновлювальних джерел енергії середня кількість корисних копалин, необхідних для нової одиниці встановленої потужності з виробництва електроенергії, зросла на 50 %.

Застосування різноманітних видів мінеральних ресурсів залежать від технології, що їх використовує. Літій, нікель, кобальт, марганець та графіт мають вирішальне значення для продуктивності, довговічності та щільності енергії акумуляторів. Рідкоземельні елементи необхідні для постійних магнітів, життєво важливі для вітрогенераторів та електродвигунів. Електричним мережам потрібна величезна кількість міді та алюмінію, а мідь є наріжним каменем для всіх питань, пов'язаних з електроенергетичною технологією.

Поступовий перехід до «чистої» енергетики повинен призвести до значного збільшення потреби на ці мінерали, тобто енергетичний сектор стає рушійною силою на ринках корисних копалин. До середини

2010-х років енергетичний сектор формував незначну частину загального обсягу попиту на більшість корисних копалин. Проте, коли енергетичний перехід почав набирати темп, технології «чистої» енергії стали найбільш швидкозростаючим сегментом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сценарії, який відповідає цілям Паризької угоди [1], частка технологій «чистої» енергії у загальному попиті значно зростає протягом наступних двох десятиліть до понад 40 % для міді та рідкісноземельних елементів, 60-70 % для нікелю та кобальту та майже 90 % для літію. Електричні двигуни та акумуляторні батареї вже витіснили побутову електроніку з сегменту найбільших споживачів літію, і тепер збільшують також споживання нержавіючої сталі, оскільки до 2040 року вони стануть найбільшими кінцевими споживачами нікелю.

Розвинені країни прискорюють свої зусилля щодо скорочення викидів, разом з цим їм необхідно бути переконаними, що їх енергетичні системи залишаються стійкими та безпечними. Сучасні міжнародні механізми енергетичної безпеки розроблені для того, щоб забезпечити страхування від ризиків збоїв або стрибків цін поставки вуглеводнів, особливо нафти.

Декарбонізація енергетики вимагає від тих, хто формує енергетичну політику, звернути свою увагу на нові потенційно вразливі позиції енергетичної безпеки, зокрема забезпечення критичними мінеральними ресурсами. Тому занепокоєння щодо нестабільності цін та безпеки постачання зростають в розвинених країнах, енергетичні системи

яких мають значну частку відновлювальних джерел енергії.

Формулювання цілей статті. Метою даної статті є звернути увагу на значення критичних мінералів та їх роль в переході до «чистої» енергетики. В роботі використано методи аналізу й синтезу, порівняльного аналізу та системного підходу. Матеріалами слугували наукові доповіді міжнародних організацій, приватних і публічних компаній, публікації зарубіжних, присвячені зазначеній проблематиці.

Викладення основних матеріалів дослідження. Метали, мінерали та

природні матеріали є частиною нашого повсякденного життя, а доступ до них є стратегічним питанням безпеки.

Перехід до кліматичної нейтральності для того, щоб зменшити загрози зовнішньої залежності від викопного палива (енергетична безпека), зважаючи на зростання світового попиту на ресурси, можна вирішити шляхом зменшення та повторного використання матеріалів перед їх переробкою (циклічна економіка).

На рисунку 1 представлені критично важливі види сировини для розвинених країн.

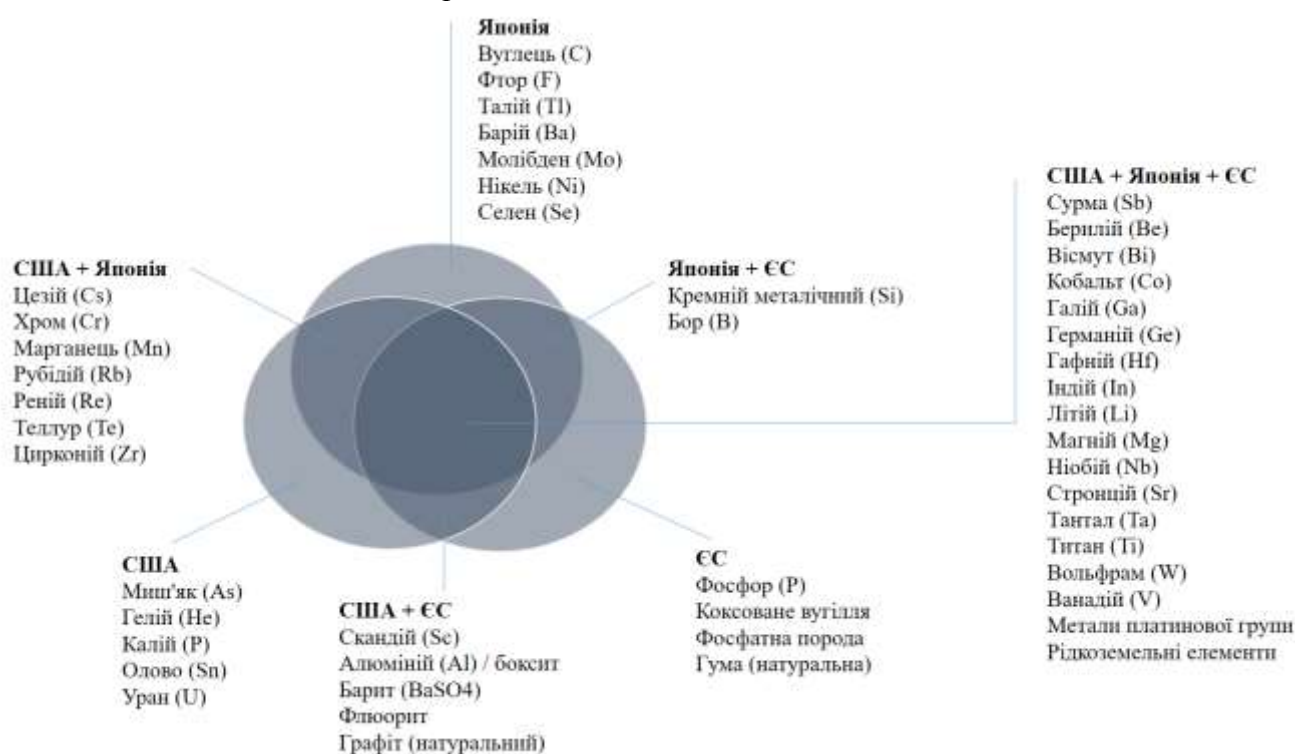


Рис. 1. Критично важлива сировина для розвинених країн

Джерело: [2], [3], [4]

Як видно з рисунку, критичною для економік розвинених країн є ціла низка корисних копалин. Поставка багатьох критично важливих видів сировини, як можна побачити на рисунку 2, є висококонцентрованою, тобто видобуток мінералів відбувається в одній, або декількох країнах. Потреба у критично важливих видах ресурсів економіками розвинених країн за галузями представлено в таблиці 1.

Як видно з таблиці 1, практично у всіх галузях сучасної промисловості використовуються критично важливі види сировини, які знаходяться за межами розвинених країн.

Сучасні плани постачання корисних копалин та інвестицій у їх видобуток не відповідають тому рівню, який необхідний для трансформації енергетичного сектору в розвинених країнах, що підвищує ризик затримки або збільшення ціни енергетичного переходу.

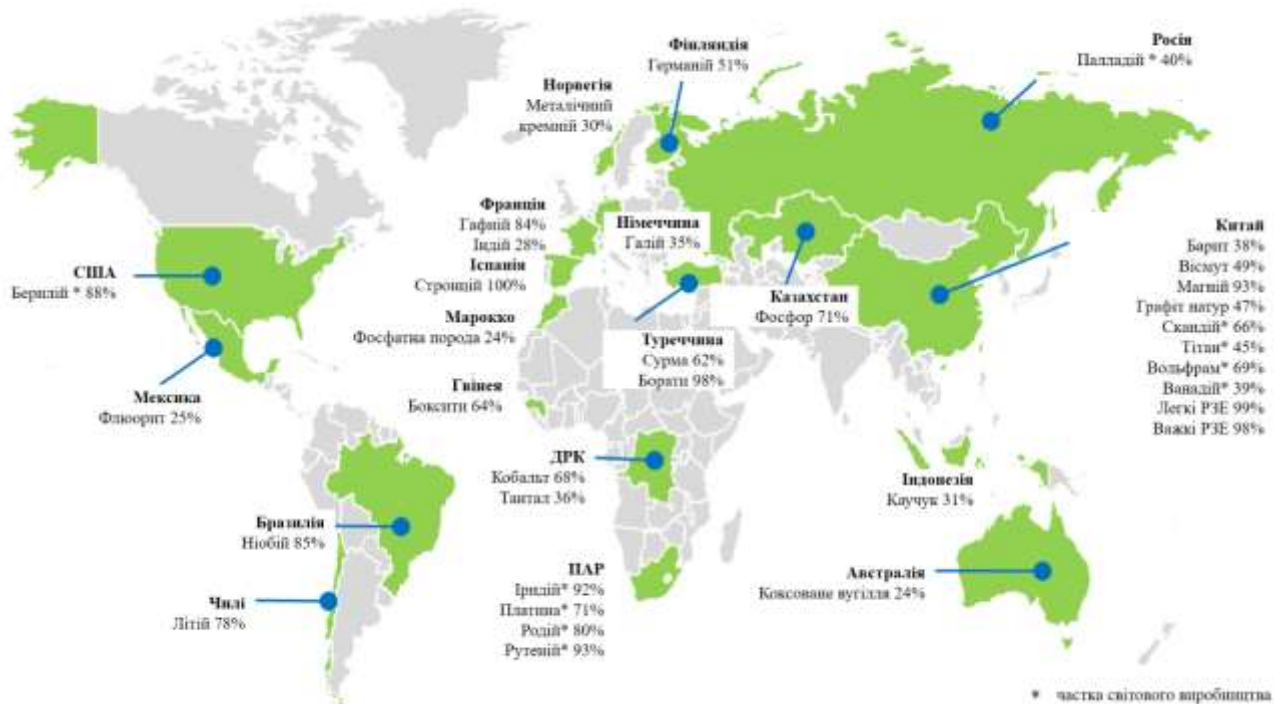


Рис. 2. Найбільші постачальники критично важливих видів сировини

Джерело: [3]

Таблиця 1

Використання критично важливої сировини галузями економіки

Галузь / Сировина	Аеро-космічна / оборонна	Текстильна	Електроніка	Мобільність / Автомобілі	Енергетичні галузі	Відновлю-вальна енергетика	Сільське господарство	Медицина	Цифрова	Будівництво	Торгівля
Сурма	✓	✓		✓						✓	
Барит				✓	✓			✓		✓	
Боксит	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Берилій	✓		✓	✓		✓			✓		
Вісмут	✓		✓		✓			✓	✓	✓	
Борат	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
Кобальт	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓		
Коксоване вугілля				✓	✓	✓					
Флюорит					✓		✓				✓
Галій	✓		✓	✓		✓			✓		
Германій	✓		✓		✓	✓					

Гафній	✓		✓		✓	✓			✓		
Індій	✓		✓			✓			✓		
Літій	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓		
Магній	✓		✓	✓	✓				✓	✓	
Графіт природний	✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓	
Натуральний каучук	✓	✓		✓				✓			
Ніобій	✓		✓	✓	✓			✓		✓	
Фосфатна порода					✓		✓				
Фосфор	✓				✓		✓				
Скандій	✓			✓		✓					
Кремній металічний	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	
Стронцій	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	
Тантал	✓		✓	✓	✓	✓					
Титан	✓		✓	✓	✓			✓		✓	
Вольфрам	✓		✓	✓	✓			✓			
Ванадій	✓			✓	✓	✓		✓		✓	
Метали платинової групи	✓		✓	✓	✓	✓		✓			
Важкі РЗЕ	✓		✓	✓	✓	✓		✓		✓	
Легкі РЗЕ	✓		✓	✓	✓	✓		✓		✓	

Джерело: [3], [5]

На сьогоднішній день на різних стадіях розвитку існує безліч проектів, пов'язаних із видобутком критично важливих видів сировини, які значно впливають на попит на ринку та збільшують волатильність цін на ньому. Разом з цим можна виділити спільні риси для всіх цих проектів:

– Висока географічна концентрація видобутку: Видобуток багатьох корисних копалин є більш концентрованим, ніж нафти або природного газу. Для літію, кобальту та рідкісноземельних елементів три найбільші країни-виробники

контролюють три чверті світового виробництва. У деяких випадках одна країна відповідає за приблизно половину світового видобутку: Демократична Республіка Конго (ДРК) і Народна Китайська Республіка (Китай) мають приблизно 70 % і 60 % світового виробництва кобальту та рідкісноземельних елементів відповідно. Рівень концентрації ще вищий для переробки, де Китай має сильні позиції по всіх напрямках (частка переробки нікелю становить близько 35 %, 50-70 % для літію

та кобальту та майже 90 % для рідкісноземельних елементів). Китайські компанії також зробили значні інвестиції в закордонні активи в Австралії, Чилі, ДРК і Індонезії. Тому високий рівень концентрації, посилений складними ланцюгами поставок, збільшує ризики, які можуть виникнути через фізичний зрив постачання, обмеження торгівлі або інші події в основних країнах-виробниках.

– Тривалий час розробки проекту: Як показує досвід в середньому від початку вишукувальних робіт до виробничого видобутку минає 16 років. Такий тривалий термін порушує питання про здатність постачальників нарощувати обсяг видобутку в умовах зростаючого попиту, що в свою чергу призводить до тиску на ринку та волатильності цін.

– Зниження якості ресурсів: В останні роки якість руди продовжує падати у різних видах сировини. Видобування металу з руд з низькою концентрацією вимагає більшої кількості енергії, що впливає на вартість видобутку, збільшує викиди парникових газів та обсяги відходів.

– Зростаючий контроль за екологічними та соціальними показниками: Виробництво та переробка мінеральних ресурсів породжує різноманітні екологічні та соціальні проблеми. В свою чергу споживачі та

інвестори все частіше закликають компанії видобувати корисні копалини відповідально.

– Більш високий вплив кліматичних ризиків: Видобуток деяких мінеральних ресурсів, зокрема міді та літію, вимагає значного споживання води. В той же час понад 50 % сьогоденного виробництва літію та міді зосереджено у районах, де відчуваються проблеми з водою. В таких великих регіонах-виробниках як Австралія, Китай та Африка спостерігаються нестабільні кліматичні умови від сильної спеки до повеней, що створює значні проблеми для забезпечення надійних поставок.

Зазначені ризики є реальними, але у більшості випадків керованими. Те, як уряди країн та бізнес будуть реагувати на ризики, в майбутньому покаже, чи корисні копалини є необхідними засобами для переходу на «чисту» енергію, або слабкою ланкою у процесі переходу.

В таблиці 2 наведено використання критично важливих видів сировини різними видами «чистих» енергетичних технологій.

Нижче пропонується аналіз попиту на критично важливі види мінеральної сировини «чистими» енергетичними технологіями за напрямками наведеними в таблиці 2.

Таблиця 2

Використання критично важливої сировини «чистими» енергетичними технологіями

<i>Технології</i>	<i>Атомна енергетика</i>	<i>Гідроенергетика</i>	<i>Сонячна енергетика</i>	<i>Вітрова енергетика</i>	<i>Біоенергетика</i>	<i>Електромобілі та накопичувачі електроенергії</i>	<i>Воднева енергетика</i>	<i>Геотермальна енергетика</i>	<i>Уловлювання та зберігання вуглецю</i>	<i>Електричні мережі</i>
<i>Сировина</i>										
<i>Кадмій</i>	✓		✓							
<i>Хром</i>	✓	✓		✓	✓			✓	✓	
<i>Кобальт</i>	✓				✓	✓	✓		✓	

<i>Мідь</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Галій</i>			✓							
<i>Германій</i>			✓							
<i>Гафній</i>	✓								✓	
<i>Індій</i>	✓		✓							
<i>Паладій</i>	✓									
<i>Свинець</i>	✓	✓			✓					✓
<i>Літій</i>						✓				
<i>Магній</i>		✓								
<i>Марганець</i>		✓		✓		✓			✓	
<i>Молібден</i>	✓	✓		✓				✓	✓	
<i>Нікель</i>	✓			✓		✓	✓	✓	✓	
<i>Ніобій</i>	✓								✓	
<i>Платинова група</i>							✓			
<i>Рідкісні елементи</i>				✓		✓	✓			
<i>Реній</i>	✓								✓	
<i>Селен</i>			✓							
<i>Срібло</i>	✓		✓							
<i>Тантал</i>									✓	
<i>Теллур</i>			✓							
<i>Олово</i>	✓		✓							
<i>Титан</i>	✓				✓			✓		
<i>Вольфрам</i>	✓									
<i>Ванадій</i>	✓								✓	
<i>Ітрій</i>	✓						✓		✓	
<i>Цинк</i>		✓			✓					
<i>Цирконій</i>	✓						✓			

Джерело: [5], [6]

Попит та пропозиція мінеральної сировини для атомної енергетики

Сировина	Пропозиція 2019 на світовому ринку, кілотонн	Попит, кг/МВт
Гафній	0,082	0,48
Індій	0,76	1,6
Срібло	27	8,3
Молібден	290	70,8
Нікель	2 700	255,5
Вольфрам	85	5,0
Ітрій	10-14	0,5
Ніобій	74	2
Цирконій	1 400	30,5
Кадмій	25	0,5
Хром	44 000	426,7
Олово	310	4,6
Ванадій	73	0,6
Мідь	20 000	59,6
Свинець	4 500	4,3
Титан	7 660	1,5
Кобальт	140	0

Джерело: [7]

Аналізуючи сучасний стан енергетики, яка працює на основі технологій «чистої» енергії, слід відзначити, що у порівнянні з традиційною енергетикою використання критично важливих видів сировини в перспективі буде зростати в рази.

Атомна енергетика на сьогоднішній день є одним з найбільших виробників «чистої» енергії. В таблиці 3 пропонується порівняння світової пропозиції та попиту (кг/МВт встановленої потужності) на критичні мінеральні ресурси для атомної енергетики.

У 2020 році налічувалося 393 ГВт ядерних потужностей, які виробляли 10 % електричної енергії у світі [8]. Спираючись на прогнози Всесвітньої ядерної асоціації (World Nuclear Association), до 2030 року

планується зростання ядерних потужностей до рівня від 462 ГВт (за песимістичним сценарієм) до 537 ГВт (за оптимістичним сценарієм), а до 2040 року від 569 ГВт до 776 ГВт відповідно [9]. Виходячи з цього прогнозу, найбільший попит цієї технології у 2040 році буде на гафній та індій.

Гідроенергетика є найбільшим виробником «чистої» енергії, виробляючи 17% електричної енергії у світі і мала 1 332 ГВт встановлених потужностей на кінець 2020 року. Хоча гідроенергетика використовує значно більше цементу та бетону, ніж будь-яка інша технологія, вона має більш низьку мінералоємність у порівнянні з іншими джерелами низьковуглецевої енергії. Основними

матеріалами, що використовуються, є алюміній, латунь, хром, мідь, залізо, свинець, магній, марганець, молібден, цинк, а рідкоземельні метали не використовуються.

У 2020 році налічувалося 714 ГВт [10] встановлених потужностей **сонячної енергетики**, які виробляли 3% електричної енергії у світі. Спираючись на прогнози Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA) до 2030 року планується зростання встановлених потужностей сонячної енергетики до 2 037 ГВт [11].

Сонячна енергетика базується на виробництві електричної енергії сонячними фотоелектричними панелями, наразі поділяється на різні підтехнології, найпоширеніші з них (ті які сьогодні пропонуються на ринку):

- полікристалічні та монокристалічні пластини на основі кристалічного кремнію (с-Si);
- телурид кадмію (CdTe);
- мідний індій-галієвий диселенід (CIGS);
- аморфний кремній (а-Si).

Три останні технології спільно відомі як тонкоплівкові технології.

В даний час розробляються інші інноваційні фотоелектричні технології, такі як багатоперехідні осередки або гібридні пристрої на нанорозмірному рівні. Ці нові технології обіцяють більшу ефективність та скорочення витрат у довгостроковій перспективі.

Матеріали, що використовуються в сонячних фотоелектричних моделях, класифікуються на дві основні групи: загальні матеріали, що не є елементами, які використовуються у фотоелектричних модулях та системах (бетон та сталь (системні опорні структури), пластик, скло (підкладки, захисний шар сонячного модуля), алюміній (рамки модуля, стелажі, опори), мідь (електропроводка, кабелі, заземлення, інвертори, трансформатори, стрічки з фотоелектричними елементами)) та матеріали, необхідні для виробництва самого сонячного елемента: кремній (технології с-Si та а-Si), срібло (технологія с-Si), германій (технологія а-Si), кадмій, телур (технологія CdTe), мідь, бор, галій (технологія CIGS). В таблиці 4 пропонується порівняння світової пропозиції та попиту (кг/МВт встановленої потужності) на критичні мінеральні ресурси для сонячної енергетики.

Таблиця 4

Попит та пропозиція мінеральної сировини для сонячної енергетики

<i>Сировина</i>	<i>Пропозиція 2019 на світовому ринку, кілотонн</i>	<i>Попит, кг/МВт</i>
<i>Телур</i>	0,47	4,7
<i>Індій</i>	0,76	4,5
<i>Олово</i>	310	463,1
<i>Срібло</i>	27	19,2/6,5*
<i>Галій</i>	0,32	0,12
<i>Кадмій</i>	25	6,1
<i>Селен</i>	2,8	0,5
<i>Мідь</i>	20 000	2 194,1
<i>Свинець</i>	4 500	269,3
<i>Срібло</i>	27	6,5

*Для геліоконцентраторів.
 Джерело: [7]

Очікується, що з подальшим розвитком сонячної енергетики в найближчі 10-15 років значно буде зростати попит на телур, індій та галій, а також олово та срібло.

У 2020 році налічувалося 733 ГВт [10] встановлених потужностей **вітрової енергетики**, які виробляли 6 % електричної енергії у світі. Спираючись на прогнози Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії, до 2030 року планується зростання вітрових встановлених потужностей до 1 455 ГВт [11].

У вітровій енергетиці використовується близько 25 тисяч компонентів для будівництва одного вітрогенератора, які згруповані в декілька основних систем, таких як вежа, гондола та ротор. На вежу припадає значна частина всього вітрогенератора, як за розміром, так і за масою, але найбільша частина маси знаходиться в фундаменті (75 %). В турбіні (без врахування фундаменту) гондола та ротор складають приблизно 20 % ваги самої турбіни. Різні матеріали складають окремі частини компонентів системи.

Сталь і нержавіюча сталь використовуються у виробництві кількох компонентів, включаючи вежу, гондолу, ротор та фундамент. Крім заліза, у виробництві сталі використовується величезна кількість дрібних і неблагородних металів, таких як нікель, молібден, марганець та хром. За даними Всесвітньої асоціації сталі, близько 85 % вітрових турбін у всьому світі виготовляються переважно зі сталі. Проте також використовуються бетонні вежі, бетонні основи зі сталевими верхніми перетинами та решітчасті башти.

У самій турбіні сталь становить у середньому 80 % від загальної маси. Крім башти, виготовленої переважно з листової сталі, коробка передач, генератор і турбінний трансформатор також в основному складаються з конструкційної сталі та нержавіючої сталі.

Бетон і сталь є основними матеріалами для фундаментів вітрових турбін і використовуються в різних типах турбін, в залежності від розташування вітрової

електростанції, конкретних вимог виробників і клієнтів турбін або умов заснування в різних місцях. Берегові фундаменти складаються з великих бетонних і сталевих майданчиків, незалежно від того, чи є це системи з гравітаційним кріпленням або з якорем. Більшість берегових конструкцій спираються на моноконструкції, що складаються з товстого сталевого циліндра, який кріпиться безпосередньо до морського дна. В середньому бетон становить 93-95 % наземних фундаментів, решта-нелеговані та низьколеговані сталі.

Алюміній використовується у виробництві стійких, але легких компонентів, таких як вежа турбіни та гондола. Крім самої турбіни, алюміній також використовується у виробництві кабелів в турбіні.

Мідь переважно використовується в обмотках котушок у статорній та роторній частинах генератора, у високовольтних силових кабельних проводах, котушках трансформаторів та заземленні.

Свинець використовується для обшивки кабелів при морській передачі електроенергії. Рідкоземельні елементи і бор необхідні для конструкцій турбін, які використовують постійні магніти. Більшість турбін з прямим приводом, але також в різній мірі певні технічні конструкції з коробками передач, оснащені генераторами постійних магнітів, які зазвичай містять неодим і меншу кількість диспрозію.

В середньому постійний магніт містить 28,5 % неодиму, 4,4 % диспрозію, 1 % бору та 66 % заліза і важить до 4 тонн. Існує також незначне використання рідкісноземельних елементів у магнітах у башті турбіни для кріплення внутрішніх кріплень.

В таблиці 5 пропонується порівняння світової пропозиції та попиту (кг/МВт встановленої потужності) на критичні мінеральні ресурси для вітрової енергетики.

Очікується, що з подальшим розвитком вітрової енергетики в найближчі

десятиріччя значно буде зростати попит на диспрозій, неодим та молібден.

Біоенергетика (тут розглядається виробництво електричної та теплової енергії, виробництво біопалива) сьогодні є основним джерелом відновлюваної енергії, яка генерує стільки ж електроенергії, скільки сонячна фотоелектрична енергія у

2019 році, маючи загальну встановлену потужність 126 ГВт. Потреби біоенергетики схожі із загальними потребами в мінералах при виробництві електроенергії станціями на вугіллі та газі (алюміній, латунь, чавун, хром, кобальт, бетон, мідь, свинець, сталь, діоксид титану).

Таблиця 5

Попит та пропозиція мінеральної сировини для вітрової енергетики

Сировина	Пропозиція 2019 на світовому ринку, кілотонн	Попит, кг/МВт
Диспрозій	1,2	2,8
Неодим	18	40,6
Молібден	290	136,6
Нікель	2 700	663,4
Мідь	20 000	1142,9
Хром	44 000	902,4
Манган	19 000	80,5

Джерело: [7]

У 2020 році було вироблено 144 млрд літрів рідкого **біопалива** (2019 рік – 163 млрд літрів). Для порівняння у 2020 році у світі споживалося в середньому 139 млрд літрів рідкого палива щодня (2019 рік – 159 млрд літрів) [12]. Спираючись на прогнози Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії, до 2030 року планується зростання виробництва до 285 млрд літрів [11]. При виробництві рідкого біопалива під час процесу Фішера-Тропша (Ф-Т) використовуються різноманітні каталізатори, в основі яких є такі перехідні метали як кобальт, залізо та рутеній. Кобальтові каталізатори більш активні для синтезу під час процесу Ф-Т, коли сировиною є природний газ, тоді як залізні каталізатори є кращими для сировини нижчої якості, таких як вугілля або біомаса. Кобальт не має значного попиту на ринку, а попит на рутеній щороку збільшується лише приблизно на 2-3 %. Виробництво рідкого біопалива витісняє виробництво рідкого палива з викопного

палива з використанням тих самих каталізаторів, тому навіть такий рівень додаткового попиту на рутеній є незначним, крім того, існують технології утилізації для відновлення каталізаторів.

Електромобілі та системи зберігання енергії. У 2020 році продажі електромобілів у всьому світі зросли до приблизно 3 мільйонів, досягнувши частки ринку понад 4 % [13].

Як наслідок, зараз у світі більше 10 мільйонів електрокарів. Станом на середину 2021 року понад 20 країн оголосили про цілі 100 % використання транспортних засобів з нульовим викидом або поступову відмову від автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння до 2050 року. Більшість великих автомобільних ринків в даний час пропонують певну форму субсидій або зменшення податків на придбання електромобілів, а також схеми підтримки розгортання інфраструктури зарядки.

Нові технології та бізнес-моделі, такі як спільне користування транспортним

засобом, автономні транспортні засоби, що, як очікується, матимуть набагато більш інтенсивне використання, ніж приватні транспортні засоби, можуть змінити прогнози попиту на нові транспортні засоби та корисні копалини у довгостроковій перспективі.

Станом на кінець 2020 року до електричних мереж було підключено близько 15,5 ГВт систем зберігання енергії. Перспективи будівництва систем зберігання енергії пов'язані із розвитком технічних інновацій (особливо відновлювальної енергетики) та нових бізнес-моделей. До 2040 року передбачається зростання систем зберігання енергії у 25 разів [14].

У двигунах (синхронні з постійним магнітом та асинхронні) та акумуляторах електромобілів використовується цілий ряд мінералів.

Двигуни з постійним магнітом є більш дорогими порівняно з асинхронними, оскільки під час свого виробництва 1 автомобіль потребує неодим (0,25–0,50 кг), рідкоземельні метали (0,06–0,35 кг), мідь (3–6 кг), залізо (0,9–2 кг), бор (0,01–0,03 кг). В асинхронних двигунах використовується 11-24 кг міді, але не використовуються рідкоземельні елементи.

Літій-іонні акумулятори, що використовуються в електромобілях та системах зберігання енергії, містять ряд мінералів: в матеріалі активного катода (наприклад, літій, нікель, кобальт і марганець), анод (наприклад, графіт) та струмозбірник (наприклад, мідь). Решта компонентів складаються переважно з алюмінію, сталі, охолоджуючих рідин та електронних деталей. Потреба в кожному мінералі значно варіюється в залежності від хімії катода та анода.

Перспективною вважається **воднева енергетика**. Проте досі існує невизначеність щодо того, який із трьох основних типів установок для отримання водню може домінувати на ринку.

Лужний електроліз – це зріла комерційна технологія, яка використовується з 1920 -х років як на малих, так і на великих установках. Однак

дуже великі установки не були побудовані протягом останніх десятиліть, оскільки вони були неконкурентоспроможними щодо виробництва водню з природного газу. Найбільший розмір установок, які будуються сьогодні, мають потужність близько 10 МВт. Порівняно з іншими технологіями електролізу виробничі потужності для лужних електролізерів значні – приблизно 2 ГВт. Лужні електролізери мають низькі капітальні витрати, частково через те, що вони не використовують дорогоцінних металів. Поточні проекти споживають на 1 МВт встановленої потужності 1 тону нікелю, 100 кг цирконію, 500 кг алюмінію та більше 10 тонн сталі разом з меншою кількістю кобальту та мідних каталізаторів.

Електролізери з протонообмінними мембранами мають менші розміри, гнучкіші в роботі, але технологічно менш зрілі, дорожчі та на даний час мають менший термін експлуатації. Найбільша установка потужністю 20 МВт розпочала працювати у 2021 році. Сумарні технологічні потужності становлять 500 МВт. Ця технологія може формувати попит на платину та іридій: 0,3 кг та 0,7 кг відповідно на МВт потужності.

Твердооксидні паливні елементи в найближчій перспективі не будуть домінувати на ринку, але мають значні перспективи. На 1 МВт встановленої потужності технологія потребує 150-200 кг нікелю, 40 кг цирконію, 20 кг лантану, 5 кг ітрію.

Щодо перспектив формування попиту на критичні мінеральні ресурси технологіями водневої енергетики, на сьогоднішній день важко робити прогноз, оскільки існує дуже багато припущень.

Геотермальна енергетика за оцінками фахівців може мати найбільший потенціал з усіх відновлюваних джерел енергії. На кінець 2020 року встановлено 14,1 ГВт потужностей, і за прогнозами передбачається їх зростання протягом 20 років в п'ять разів.

Дуже високі температури та потенційно корозійний характер геотермальних

резервуарів вимагають використання спеціалізованої сталі (з високим вмістом хрому, молібдену, нікелю та титану), щоб витримати суворі умови експлуатації. Тому геотермальна енергетика є одним з основних споживачів нікелю, хрому, молібдену та титану в енергетичному секторі в майбутньому.

На сьогоднішній день інформація про метали, необхідні для систем уловлювання та зберігання вуглецю (УЗВ) є неповною і розрізною. Тут можна передбачати попит на метали на основі припущень про додаткові високотехнічні специфікації сталевих сплавів, які необхідні для оновлення існуючих генераторів. Для трубопроводів вміст сталей аналогічний тим, що використовуються в нафтогазовій промисловості. Попит на метали не є постійним співвідношенням і залежить від фактичної довжини спорудженого трубопроводу. Основний незначний попит в майбутньому, в разі реалізації таких проектів, буде припадати на ванадій та ніобій, які використовуються як легуючі елементи сталі в трубопроводах. Також можливо знадобиться невелика кількість деяких інших металів, але попит на них невизначений.

Основними металами, які використовуються для електромереж, є мідь (тільки для підземних кабелів), алюміній (для наземних кабелів), свинець (як оболонка для підводних кабелів).

Висновки. Таким чином, на основі аналіз попиту на критично важливі види мінеральної сировини «чистими» енергетичними технологіями та існуючих трендів розвитку технологій, в майбутньому вбачається критична потреба в наступних металах:

1. Телур (сонячні тонкоплівочні панелі).
2. Індій (сонячні тонкоплівочні панелі та аварійні регулюючі касети).
3. Олово (кристалічний кремній для сонячних панелей).
4. Гафній (аварійні регулюючі касети).
5. Срібло (кристалічний кремній для сонячних панелей).

6. Диспрозій (постійні магніти для вітрової енергетики).

7. Галій (сонячні тонкоплівочні панелі).

8. Неодим (постійні магніти для вітрової енергетики).

9. Кадмій (сонячні тонкоплівочні панелі).

10. Нікель (сталеві сплави).

11. Молібден (сталеві сплави).

12. Ванадій (трубопроводи УЗВ).

13. Ніобій (трубопроводи УЗВ).

14. Селен (сонячні тонкоплівочні панелі).

15. Кобальт (акумулятори, суперсплави, каталізатори, магніти).

16. Літій (акумулятори).

17. Графіт (акумулятори).

18. Скандій (твердооксидні паливні елементи).

19. Кремній металічний (сонячні тонкоплівочні панелі).

20. Легкі та важкі рідкоземельні елементи (постійні магніти для електродвигунів та електрогенераторів, каталізатори, акумулятори).

Величина попиту та її траєкторія буде коригуватися відповідно до зростання ролі того чи іншого виду «чистих» енергетичних технологій. Так, зростання парку електромобілів, відповідно до експертних сценаріїв [14], буде підвищувати попит на корисні копалини для використання в електромобілях та акумуляторних батареях (літій, графіт, кобальт і нікель), розширення електричних мереж буде сприяти зростанню попиту на мідь. Гідроенергетика, біоенергетика та ядерна енергетика будуть формувати незначний, але все ж таки попит на мінеральні ресурси. Зростання сектору водневої енергетики забезпечить попит на нікель і цирконій для електролізерів і на метали платинової групи для паливних елементів. Відповідно можна прогнозувати, що ціни на мінеральні ресурси також будуть впливати на розвиток тих чи інших енергетичних технологій.

Зважаючи на значний технічно-досяжний потенціал «чистих»

енергетичних технологій, розвинуту наукову та промислову базу, їх подальший розвиток слід планувати з урахуванням економічної та екологічної ефективності, зважаючи на локальні умови місць розташування об'єктів генерації.

Енергетичний перехід та безпека постачання корисних копалин стають важливими чинниками у забезпеченні енергетичної безпеки в світі, де ключову роль традиційно займають нафта, газ та вугілля. Енергетичний перехід потребує значного зростання інвестицій у розробку запасів корисних копалин, щоб не відставати від темпів зростання попиту. Враховуючи тривалий час розробки нових проектів з видобутку корисних копалин, вбачається необхідним розвивати диверсифікацію поставок. А інтенсивне впровадження інновації у виробничих технологіях створює потенціал для зростання «чистих» енергетичних технологій.

Література:

1. Paris Agreement. 2015. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
2. Final List of Critical Minerals 2018. Federal Register. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2018-05-18/pdf/2018-10667.pdf>
3. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards Greater Security and Sustainability. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 3.9.2020, COM (2020) 474 final. URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42849>
4. Issues for Consideration in Formulating A New International Resource Strategy. Ministry of Economy, Trade and Industry, Government of Japan. Tokyo. 4.10.2019. URL: https://www.meti.go.jp/english/press/2020/0330_005.html
5. Moss, R. L. Tzimas, E. Kara, H. Willis, P. Kooroshy, J. (2011), Critical Metals in Strategic Energy Technologies: Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies, *EC JRC*. 2011. doi: 10.2790/35716.
6. Ashby, M. F. Materials for low-carbon power, in materials and the environment. 2013. doi:10.1016/b978-0-12-385971-6.00012-9.
7. Mineral Commodity Summaries 2020. U.S. Geological Survey. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>

8. World Nuclear Power Reactors&Uranium Requirements. World Nuclear Organisation. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>

9. Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2019-2040. World Nuclear Organisation. URL: <https://world-nuclear.org/getmedia/b488c502-baf9-4142-8d12-42bab97593c3/nuclear-fuel-report-2019-expanded-summary-final.pdf.aspx>

10. Renewable Capacity Statistics 2021. International Renewable Energy Agency. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf

11. Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050. International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>

12. Short-Term Energy Outlook. U.S. Energy Information Administration. URL: https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/global_oil.php

13. Global EV Outlook 2021. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>

14. World Energy Outlook 2020. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>

References:

1. United Nations Framework Convention on Climate Change (2015). Paris Agreement. Retrieved from : https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
2. Federal Register (2018). Final List of Critical Minerals. Retrieved from : <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2018-05-18/pdf/2018-10667.pdf>.
3. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (2020). Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards Greater Security and Sustainability. Brussels, 3.9.2020, COM (2020) 474 final. Retrieved from : <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42849>.
4. Ministry of Economy, Trade and Industry (2019). Issues for Consideration in Formulating A New International Resource Strategy. Tokyo: Government of Japan, 4.10.2019. Retrieved from : https://www.meti.go.jp/english/press/2020/0330_005.html.
5. Moss, R.L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., Kooroshy, J. (2011), Critical metals in strategic energy technologies: assessing rare metals as supply-chain bottlenecks in low-carbon energy technologies, *EC JRC*. DOI: 10.2790/35716.

6. Ashby, M. F. (2013), Materials for low-carbon power in materials and the environment. DOI:10.1016/b978-0-12-385971-6.00012-9.

7. U.S. Geological Survey (2020), Mineral Commodity Summaries 2020. Retrieved from : <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>.

8. World Nuclear Organisation (2021), World Nuclear Power Reactors&Uranium Requirements. Retrieved from : <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>.

9. World Nuclear Organisation (2020), Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2019-2040. Retrieved from : <https://world-nuclear.org/getmedia/b488c502-baf9-4142-8d12-42bab97593c3/nuclear-fuel-report-2019-expanded-summary-final.pdf.aspx>.

10. International Renewable Energy Agency (2021), Renewable Capacity Statistics 2021. Retrieved from : <https://www.irena.org/>

[/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf](#).

11. International Renewable Energy Agency (2020), Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050. Retrieved from : <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>.

12. U.S. Energy Information Administration (2021), Short-Term Energy Outlook. Retrieved from : https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/global_oil.php.

13. International Energy Agency (2021), Global EV Outlook 2021. Retrieved from : <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>

14. International Energy Agency (2020), World Energy Outlook 2020. Retrieved from : <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.

Стаття надійшла до редакції 13.09.2021 р.