

УДК 338.1:519.2
JEL Classification: C10, L10

DOI: <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2025.1.27>

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

РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ В СИСТЕМАХ СОНЯЧНОЇ ТА ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

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 IN SOLAR AND WIND ENERGY SYSTEMS

Постановка проблеми. В сучасних умовах розвиток зеленої енергетики набуває особливої актуальності у зв'язку з необхідністю переходу до сталого енергетичного балансу та зменшення викидів парникових газів, адже на енергетичний сектор припадає близько 75% таких викидів. У межах Європейського зеленого курсу ЄС запровадив стабільну та амбітну енергетичну політику для досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року.

Водночас масове впровадження технологій відновлюваної енергетики висвітлює нові виклики, пов'язані із забезпеченням ресурсної бази, зокрема рідкісноземельних елементів, без яких неможливе ефективне функціонування сучасних технологій сонячної та вітрової генерації. Постає проблема раціонального використання та оптимізації ланцюгів постачання цих критично важливих матеріалів для підтримки безперервного розвитку екологічно чистих технологій.

У системах сонячної енергетики рідкісноземельні елементи застосовуються для підвищення ефективності фотоелектричних елементів завдяки їхнім унікальним оптичним та електронним властивостям. Водночас у вітроенергетиці магніти на основі неодиму та диспрозію забезпечують стабільну роботу генераторів за умов змінних вітрових навантажень. Такий масштабний попит створює значне навантаження на світову систему постачання рідкісноземельних ресурсів.

Агресивна війна Росії проти України та застосування енергетичної зброї поставили під загрозу енергетичну безпеку Європи, а відтак і її економічну стабільність. Криза в Червоному морі, військові перевороти на Африканському континенті, конфлікти на Близькому Сході, економічне протистояння США та Китаю – усі ці чинники перетворили постачання рідкісноземельних елементів на питання національної безпеки для багатьох передових країн. Одночасно ціни на ці матеріали досягли десятирічних максимумів, що суттєво вплинуло на вартість обладнання для галузі [1].

У контексті переходу до сталого розвитку актуалізується потреба у формуванні замкнених циклів використання рідкісноземельних елементів, розробці альтернативних матеріалів і вдосконаленні методів їх рециркуляції. Вирішення окресленої проблематики є запорукою досягнення цілей кліматичної політики, побудови низьковуглецевої економіки, забезпечення енергетичної безпеки та стабілізації ринків.

В цій статті ми розглянемо рідкісноземельні елементи (РЗЕ), що застосовуються в галузях зеленої енергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рідкісноземельні метали становлять групу з сімнадцяти хімічних елементів, серед яких 15 лантанодів, а також скандій і ітрій. У 1794 році шведський хімік Йоган Гадолін уперше ідентифікував ітрій (Y), започаткувавши наукове вивчення цієї групи елементів. Відтоді технологічні процеси видобутку та переробки рідкісноземельних металів зазнали суттєвого розвитку, що сприяло їх широкому впровадженню в галузях високих технологій, зокрема в електроніці, енергетиці, та виробництві новітніх матеріалів.

Останні десятиліття характеризуються значними досягненнями у дослідженні рідкісноземельних металів, їхніх властивостей та методів отримання. Сучасний світ технологій неможливо уявити без цих металів, адже їхнє застосування у високотехнологічних галузях призвело до їхнього стрімкого розвитку. Значний внесок у цю сферу зробили численні зарубіжні та вітчизняні фахівці з хімії, фізики та матеріалознавства, серед яких Карл Густав Мосандер, Глен Т. Сейборг, Фредерік Сьоренсен, Юрій Цірлін та багато інших. У вивченні та розумінні ринку рідкісноземельних металів, їхніх властивостей і потенційних застосувань у високотехнологічних сферах вирізняється ціла плеяда вчених, таких як Габор Ковач, Карл Айвенсен, Лі Чжао, Іонела Карантоніс та багато інших [1].

Сьогодні світ прагне здійснити енергетичний перехід, заснований на технологіях «чистої» енергії, які суттєво відрізняються від традиційної енергетики, що базується на використанні вуглеводневих ресурсів. Будівництво станцій зеленої енергетики вимагає значно більшої кількості рідкісноземельних елементів (РЗЕ), ніж аналогічні об'єкти, що працюють на викопному паливі.

Частка відновлюваних джерел енергії вже становить понад половину нових потужностей із виробництва електроенергії у світі. На конференції COP29, що відбулася в Баку (Азербайджан), Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA) прогнозує у своїх звітах потроєння потужностей відновлюваної енергетики та подвоєння рівня енергоефективності до 2030 року [2].

Тому дослідження шляхів постачання рідкісноземельних елементів 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 рідкісноземельних елементів в системах сонячної та вітрової енергетики та спрогнозувати розвиток ринку цих елементів у сучасних умовах, що виникають внаслідок війни та інших чинників.

Виклад основного матеріалу дослідження. Рідкісноземельні елементи, відомі як «метали майбутнього», відіграють ключову роль у виробництві компонентів для систем сонячної та вітрової енергетики. Їхнє використання в цій галузі зростає завдяки безперервному вдосконаленню технологій.

Зокрема, потужні постійні магніти для генераторів безредукторних вітряних турбін виготовляються на основі неодиму (Nd) та диспрозію (Dy). Для одного генератора потужністю 1 МВт потрібно близько 40,6 кг неодиму та 2,8 кг диспрозію [3].

У сучасних тонкоплівкових сонячних панелях, таких як CIGS (мідій-індій-галій-селенід) та CdTe (кадмій-телурид), використовуються індій, телурид і галій, які забезпечують високу ефективність цих технологій.

Ці метали є незамінними для створення технологій сталого енергетичного переходу. Водночас, розвиток нових методів їх видобутку та переробки залишається важливим викликом для досягнення енергетичної незалежності.

У 2023 році з 473 ГВт електроенергії, здобутої з відновлюваних джерел, 81 % або 382 ГВт мали нижчу вартість, ніж енергія, вироблена з викопного палива. Зі звіту IRENA за 2024 рік видно, що протягом останніх десяти років, завдяки зниженню витрат і вдосконаленню технологій сонячної та вітрової енергетики, впровадження відновлюваної енергетики приносить значні соціально-економічні та екологічні переваги. Завдяки значному зниженню вартості – до 0,04 дол. США (чотири центи) за 1 кВт·год за рік – витрати на фотоелектричні конвертери у 2023 році були на 56 % нижчими, ніж витрати на викопне паливо та ядерну енергетику. Загалом, відновлювана енергетика, впроваджена у світі з 2000 року, дозволила заощадити до 409 млрд. дол. США на витратах на паливо в енергетичному секторі [4].

Незаперечним лідером на ринку рідкісноземельних елементів та відновлюваних джерел енергії є Китай. Так, за даними Bloomberg New Energy Finance, лише у 2015 році Китай інвестував 102 мільярди доларів США у власну галузь відновлюваної енергетики. Станом на 2018 рік Національна енергетична адміністрація Китаю (NEA) інвестувала 360 мільярдів доларів США у відновлювану енергетику та планує отримувати 20 % енергії з відновлюваних джерел до 2030 року. Однак домінування Китаю у відновлюваній енергетиці швидко зростає і за кордоном: більшість своїх інвестицій Китай спрямовує у відновлювану енергетику США, Німеччини та інших розвинених країн [5].

В ЄС досягнуто значного прогресу у сфері відновлюваної енергетики. Так, у першій половині 2024 року частка енергії, отриманої з відновлюваних джерел, становила 50 %. Вітроенергетика обігнала газ і стала другим за величиною джерелом електроенергії в ЄС після атомної. Викиди парникових газів у ЄС скоротилися на 32,5 % з 1990 по 2022 рік, тоді як економіка ЄС зросла приблизно на 67 % за той самий період [6].

На рис. 1 відображено встановлені потужності вітрових і сонячних електростанцій у ЄС за період із 2021 до 2024 року.

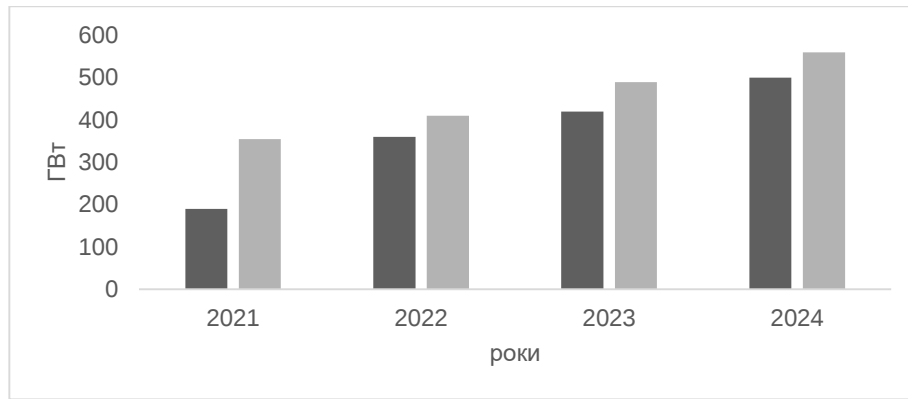


Рис. 1. Встановлена потужність вітрових та сонячних електростанцій у ЄС на 2024 рік
(■ – встановлена потужність вітрових електростанцій, ГВт; ■ – встановлена потужність сонячних електростанцій, ГВт)

Джерело: [6]

Обсяг імпорту рідкісноземельних металів до ЄС у 2022 році значно зріс, але стабілізувався у 2023 році, тоді як ціна впала на 15 % (рис. 2). Обсяг експорту рідкісноземельних металів із ЄС у 2023 році зменшився, а їх ціна впала на 11 % порівняно з 2021 роком. У 2023 році співвідношення імпорту до експорту, виміряне в натуральному вираженні, становило 3,3, що означає, що ЄС імпортував 3,3 тонни на кожну тонну, яку експортував. Основна частина імпорту рідкісноземельних металів до ЄС надходила з Китаю (39 %), за яким слідували Малайзія (33 %) та Росія (22 %) [7].

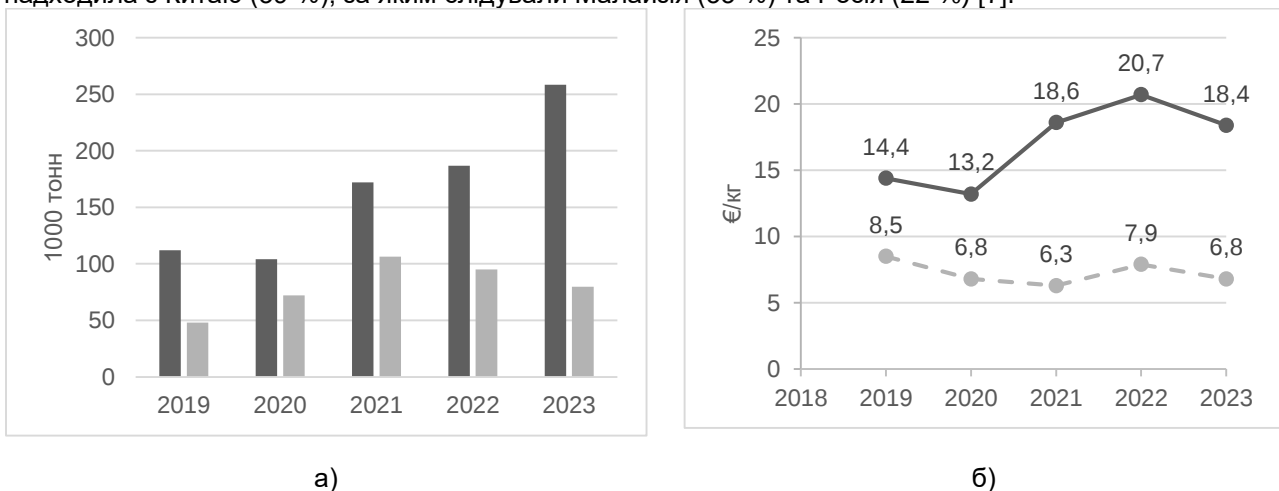


Рис. 2. Імпорт та експорт РЗЕ у ЄС, скандію та ітрію у 2023 році:
а) – імпорт та експорт РЗЕ, тис. тонн ; б) – імпорт та експорт РЗЕ, €/кг

Примітка. ■ – експорт, ■ – імпорт, €/кг;
■ – експорт, ■ – імпорт, тис. тонн

Джерело: [1; 7]

У нашому прогнозуванні ми розглянемо перехід до кліматично нейтральної економіки, орієнтуючись на концепцію «Чиста планета для всіх». Це дослідження аналізує впровадження відновлюваних джерел енергії як ключові чинники впливу на попит на сировинні ресурси. Ринок споживання ЄС вважається найбільш перспективним у контексті прогнозованого попиту на сировину рідкісноземельних елементів. Результати прогнозів відображатимуть різні рівні зростання – від високого до низького рівня розгортання цих технологій, а також підвищення або зниження ефективності використання матеріалів, тому їх слід розглядати радше як діапазон, ніж як точні значення.

Вітряні електростанції – це електростанції, які використовують енергію вітру для виробництва електроенергії. У них застосовуються вітряні турбіни, що перетворюють кінетичну енергію вітру на електричну. Вітряні електростанції складаються з ряду вітряних турбін, розташованих на відкритих ділянках суші або в морі. Вітряна енергія вважається одним із видів відновлюваної енергії, оскільки для її отримання використовується природний ресурс – вітер.

У сучасній вітроенергетиці застосовуються різні типи вітрових турбін, які відрізняються розміром, конструкцією, характеристиками та сферою використання. Деякі з них призначені для наземних умов, а інші – для морських майданчиків.

Наприклад:

1. Вітряки на основі горизонтальних вітрових турбін (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbines): ці турбіни мають горизонтальну вісь обертання. Вони широко використовуються на суходолі для генерації електроенергії.

2. Вітряки на основі вертикальних вітрових турбін (VAWT – Vertical Axis Wind Turbines): ці турбіни мають вертикальну вісь обертання і можуть бути ефективними у варіантах незалежного застосування.

3. Плаваючі вітроенергетичні установки: розташовані у відкритому морі на плавучих платформах для використання вітру в морських умовах.

4. Глибоководні вітрові турбіни розміщують на морському дні в зонах із великою глибиною, де зведення стаціонарних морських платформ є складним завданням.

Ці технології застосовують залежно від конкретних умов, і вони відрізняються продуктивністю та можливостями впровадження. Нині найпоширенішими типами вітрових турбін є EESG (синхронний генератор з електричним збудженням), PMSG (синхронний генератор з постійними магнітами), DFIG (асинхронний генератор з подвійним живленням) та SCIG (асинхронний генератор із короткозамкнутим ротором). Сучасні вітрові турбіни мають оптимізовані компоненти – генератор, привід, ротор і лопаті – для підвищення ефективності виробництва енергії та зниження її вартості.

Генератор є основним елементом вітротурбіни, що перетворює механічну енергію на електричну. Основні типи: постійного струму, змінного струму, синхронні та асинхронні. Генератори зі змінною швидкістю зменшують навантаження на лопаті й трансмісію. Сучасні генератори на постійних магнітах вирізняються високою ефективністю, компактністю та легкістю в обслуговуванні [8].

Лопаті вітрових турбін забезпечують стабільність при зміні швидкості вітру. Їх виготовляють із легких і міцних матеріалів, зазвичай зі скловолокна, хоча в майбутньому можуть стати популярнішими вуглецеві волокна.

РЗЕ, які включають неодим, празеодим і диспрозій, є ключовими компонентами надзвичайно потужного магнітного матеріалу – неодим-залізо-бор (NdFeB). Цей магніт застосовується для створення постійних магнітів у синхронних генераторах (PMSG), що є основною конфігурацією вітрових турбін. На рис. 3 перелічено найпоширеніші матеріали, що використовуються у вітрових електростанціях та їхні функціональні можливості.

Стратегічна сировина

Неодим використовується у постійних магнітах NdFeB (магніти для виробництва електроенергії)

Nd

Празеодим використовується разом з неодимом у постійних магнітах

Pr

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

Dy

Ніобій застосовується як мікролегуючий елемент у високоміцній конструкційній сталі для веж турбін

Nb

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

B



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

Cu

Алюміній використовується як найлегший матеріал в обладнанні мотогондол, лопаті тощо

Al

Марганець застосовується для виробництва сталі, що використовується для багатьох частин турбіни

Mn

Нікель застосовується у сплавах та нержавіючій сталі для різних компонентів турбіни

Ni

Молибден використовується у нержавіючій сталі, входить до складу багатьох компонентів турбіни

Mo

Свинець застосовується для пайки або оболонки кабелю в електропередачі

Pb

Хром необхідний для нержавіючої сталі та інших сплавів у роторі та лопатях

Cr

Залізо: чавун або сталь, для башти, мотогондולי, ротора і фундаменту; в NdFeB постійні магніти

Fe

Рис. 3. Матеріали, які використовуються у вітряних електростанціях

Джерело: [8]

З усіх матеріалів, які зараз використовуються у вітряних електростанціях, неодим, празеодим, диспрозій, ніобій і бор є критично важливими у списку. На рис. 4 показані ключові країни в логістичній мережі постачання сировини до вітряних електростанцій [8; 9; 10].

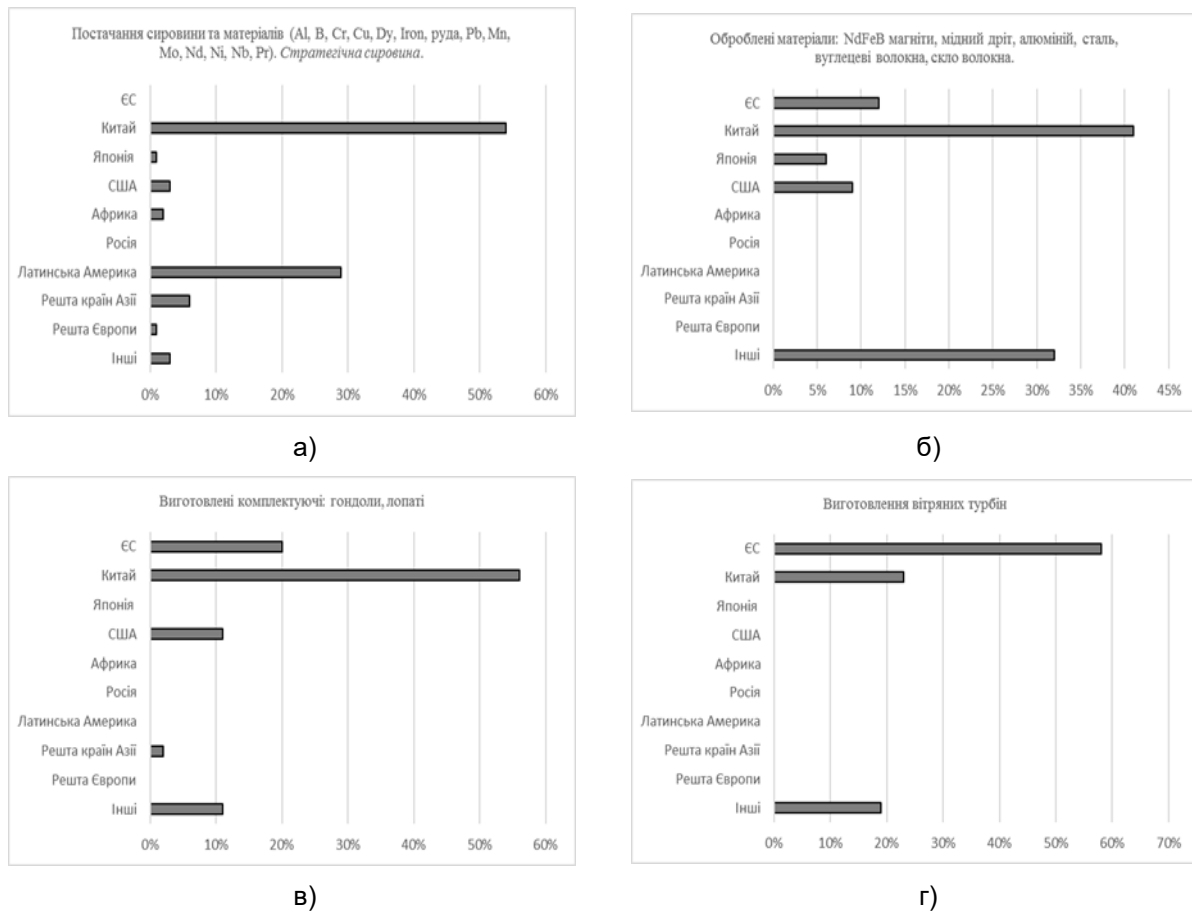


Рис. 4. Ключові країни в логістичній мережі постачання сировини до вітряних електростанцій: (а) – країни, які постачають критичну сировину та матеріали; б) – країни, які виготовляють вузли; в) – країни, які виготовляють комплектуючі; г) – країни, які постачають виготовлені вітряні турбіни

Джерело: [8; 11; 12]

На рис. 5 відображено прогнозовані потужності для наземних та морських вітроенергетичних установок. Враховуючи середні очікувані терміни служби – 25 років для наземних турбін і 30 років для морських, поєднання цих значень з пропускну здатністю дозволяє розрахувати річний обсяг розгорнутих наземних і морських потужностей, що визначає попит на матеріали (див. табл. 1).

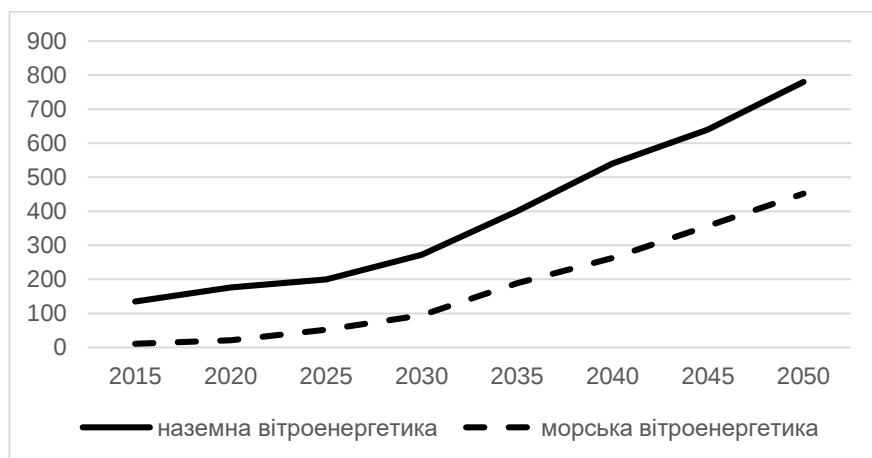


Рис. 5. Прогнозована потужність наземної та морської вітроенергетики в ЄС (потужність, ГВт)

Джерело: побудовано за результатами авторського моделювання

Таблиця 1

Щорічна потреба ЄС у матеріалах для вітроенергетики у 2030, 2040, 2050 роках

Матеріали	Роки	2030	2040	2050
Al (алюміній)	в тоннах	33000	48000	63000
борати		50	65	80
Cr (хром)		16000	24000	32000
Cu (мідь)		76000	113000	150000
Dy (диспрозій)		210	260	310
Mn (марганець)		25000	36500	48000
Mo (молібден)		3400	5000	6600
Nd (неодим)		1900	2400	2900
Ni (нікель)		11000	16000	21000
Pr (празеодим)		340	425	510
сталь		62000	910000	1200000
Tb (тербій)		70	90	110
Zn (цинк)		170000	250000	330000

Джерело: складено за результатами авторського моделювання

Подолання ризику постачання рідкісноземельних елементів для вітрових турбін на постійних магнітах є однією з основних перешкод у вітроенергетичній галузі через залежність від сировини. Навіть за умови зниження цін на рідкісноземельні матеріали до рівня 2011 року, зростання попиту на них по всьому світу може суттєво вплинути на виробництво вітроенергетики. Залежність від одного ринку, яким володіє Китай, із практичною монополією на виробництво рідкісноземельних матеріалів і постійних магнітів, викликає побоювання через ризики коливання цін і можливі торговельні суперечки між Китаєм і США. Після підвищення цін на рідкісноземельні елементи у 2011 році виробники турбін постійно працюють над підвищенням ефективності використання матеріалів у своїй продукції, зокрема зменшили вміст диспрозю в постійних магнітах. Однак ризики залишаються значними [13].

Сонячні панелі або фотоелектричні конвертери – це пристрої, які використовують фотоелектричний ефект для перетворення світлової енергії, отриманої від сонячного випромінювання, на електричну енергію.

Основний компонент сонячної панелі – фотовольтаїчний модуль, який складається зі з'єднаних між собою «сонячних клітин» (зазвичай виготовлених з напівпровідникових матеріалів, таких як кристалічний кремній (с-Si) або аморфний кремній (а-Si)). Коли фотони світла потрапляють на ці клітини, вони збуджують електрони, викликаючи їх вибивання з атомів. Цей процес створює потік електричних зарядів, який використовується для виробництва електричної енергії.

Сонячні батареї широко використовуються для виробництва електроенергії. Вони вважаються відновлювальним джерелом енергії та мають ряд переваг, зокрема, низькі викиди вуглецю і відносно низькі витрати на експлуатацію. Завдяки технологічним інноваціям вартість сонячної енергії значно знизилася протягом останніх років, що спричинило значне зростання її застосування по всьому світу.

На сьогоднішній день фотоелектричні технології включають:

– кристалічний кремній (с-Si) – основний матеріал для виробництва сонячних панелей. Це високочистий матеріал, який може бути отриманий у двох формах: монокристалічний (mono-Si) та мультикристалічний (multi-Si);

– тонкоплівкові сонячні панелі (TF) з аморфним кремнієм (а-Si) – модулі, в яких тонкі шари а-Si використовуються для збору сонячної енергії й перетворення її на електричний струм. Ці панелі легкі й гнучкі, оскільки шари кремнію наносяться на скло;

– міді-індію-галію-диселенід (CIGS) – складний напівпровідниковий матеріал, що складається з міді (Cu), індію (In), галію (Ga) та селену (Se). Такі сонячні панелі виготовляються шляхом нанесення тонких шарів CIGS на підкладку;

– кадмію-телурид (CdTe) – напівпровідниковий матеріал, в сонячних панелях CdTe тонкі шари кадмію-телуриду наносяться на підкладку.

Сонячні панелі із кристалічного кремнію переважають у світі, складаючи приблизно 95 % встановленої фотоелектричної потужності [14]. CdTe, CGIS та TF використовуються переважно у невеликих та менш потужних застосуваннях [15].

Для сонячних панелей, окрім напівпровідникових матеріалів, використовуються й інші ресурси. Срібло застосовується для збору та передачі електронів, діоксид кремнію – для скла з високим

коефіцієнтом пропускну здатності, алюміній – для рамок панелей, а мідь – як провідник у кабелях. Огляд найбільш поширених матеріалів для сонячних фотоелектричних конвертерів подано на рис. 6.

Стратегічна сировина

Кремній використовується як напівпровідниковий матеріал в кристалічних або аморфних сонячних елементах

Si

Германій використовується як напівпровідник матеріалів для багатоперехідних сонячних елементів

Ge

Галій застосовується як домішка в напівпровідниках або в технології CIGS

Ga

Індій застосовується як провідний шар ITO або в технології CIGS

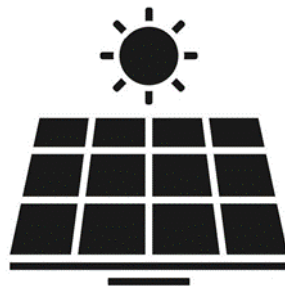
In

Бор застосовується як домішка (р-типу) в кристалічній решітці пластин на основі кремнію

B

Паладій використовується як каталізатор, що замінює частину Pt, у вигляді сплаву Pt-Pd

P



Мідь використовується у сплавах з нікелем для анодного каталізатора (SO FCs), в проводах і струмопровідних деталях. Алюміній використовується для теплового управління блоком паливних елементів і як матеріал опорної плити

Cu

Al

Нікель використовується для покриття біполярних пластин, у складі нержавіючої сталі або як анод

Ni

Mo

Молибден використовується як задній контакт для CIGS або в рамках з нержавіючої сталі

Se

Селен використовується в тонкоплівкових CIGS сонячних елементах

Sn

Олово в поєднанні зі свинцем для пайки або з індієм в струмопровідних шарах (ITO)

Te

Телур використовується у тонкоплівковому кадмієвому телуриду (CdTe) фотоелектричних технологіях

Ca

Кадмій у тонкоплівковому кадмієвому телуриду (CdTe) фотоелектричних технологіях

Fe

Залізо в сталевих сплавах для різних деталей і в системах кріплення фотоелектричних установок

Pb

Свинець у сплавах з оловом (Sn) як припой для електричних ланцюгів і з'єднувачів

Zn

Цинк як прозорий струмопровідний оксид у передньому контакті сонячних елементів

Ag

Срібло у вигляді струмопровідної пластини на передній і задній стороні кристалічних сонячних елементів

Рис. 6. Матеріали, що використовуються в сонячних панелях

Джерело: [8]

Сонячні елементи та модулі часто виробляються тими ж компаніями, що постійно підвищують ефективність і зменшують витрати. У 2007–2008 роках зростання попиту на фотоелектричні модулі підвищило вартість кремнію, що спричинило зростання цін. Прогнози розвитку галузі та ринкові тенденції змушують виробників шукати способи зменшення використання кремнію та інших матеріалів.

Швидке розширення використання відновлювальної енергії в ЄС і світі створює тиск на постачання сировини для фотоелектричних систем. Деякі матеріали, такі як кремній, індій, галій, германій і борати, мають високий ризик постачання, тоді як мідь, кадмій, селен, срібло та телур – менший. Кремній, основний матеріал для фотоелектричних елементів, стикається з проблемами доступності через недостатньо розвинені методи очищення. Виробники сонячних панелей також турбуються через можливий дефіцит полікремнію та коливання цін, зокрема, у 2017 році його ціна зросла на 35 % через закриття заводів у Китаї задля дотримання екологічних стандартів [16].

Приблизно 70 % глобальних виробничих потужностей полікремнію знаходяться в Китаї, де річний обсяг виробництва становить 388 кілотонн, а ЄС постачає лише 6 % сировини [17].

Китай домінує на ринку компонентів для сонячних технологій, займаючи близько 89 % частки. Він контролює більшість аспектів виробництва сонячних панелей, ставши лідером у цій галузі ще в 1990-х роках, коли Німеччина запровадила програму стимулювання використання сонячних панелей. Після економічної кризи 2008 року та зеленого тарифу у 2011 році, потужності Китаю значно зросли. На 2021 рік вісім з десяти найбільших виробників кристалічних кремнієвих фотоелементів були китайськими компаніями, а ще одна – з Південної Кореї (Hanwha Q Cells) та одна – з Канади (Canadian Solar) [18].

Більшість виробників кристалічних кремнієвих фотоелементів зосереджена в Китаї та інших азійських країнах, тоді як частка ЄС у виробництві таких елементів у 2022 році становила лише 0,4 %. Окремі кремнієві та тонкоплівкові сонячні модулі виробляються в ЄС на рівні близько 1,5 %, але основна частина виробництва розташована в Азії [18]. На рис. 7 показані ключові країни в логістичній мережі постачання сировини до сонячних панелей [8; 9; 10].

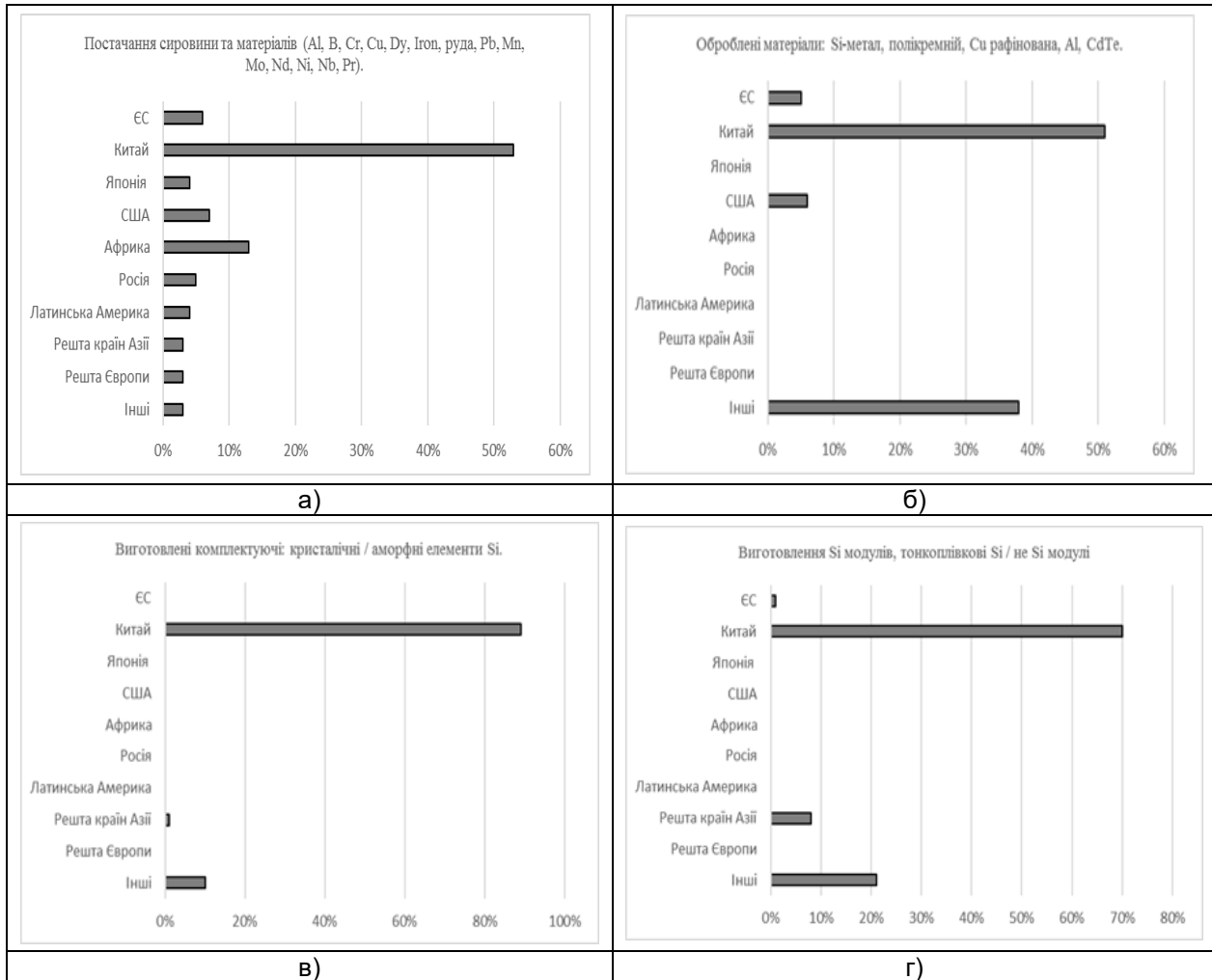


Рис. 7. Ключові країни в логістичній мережі постачання сировини до сонячних панелей: а) – країни, які постачають критичну сировину та матеріали; б) – країни, які виготовляють вузли; в) – країни, які виготовляють комплектуючі; г) – країни, які постачають виготовлені сонячні панелі

Джерело: [8; 19; 20; 21]

На рис. 8 наведено прогноз щодо потужності сонячних станцій, які, як правило, експлуатуються протягом 25 років [14]. Тому були застосовані ті ж самі припущення щодо терміну служби, що і для наземних вітроенергетичних установок. Матеріали, що використовуються у виробництві сонячних елементів за технологією фотоелектрики, включають c-Si – металевий кремній, срібло; a-Si – металевий кремній, германій; CIGS – мідь, індій, галій, селен; CdTe – кадмій, телур. Матеріали, такі як бетон, сталь, пластик, скло, алюміній та мідь, також враховуються для всіх технологій, оскільки вони застосовуються у структурних та електричних компонентах, подібно до вітроенергетики. В табл. 2 наведено річний попит на зазначені матеріали до 2030, 2040 та 2050 років. Телур, германій та індій виявилися найбільш критичними у відношенні між попитом та пропозицією.

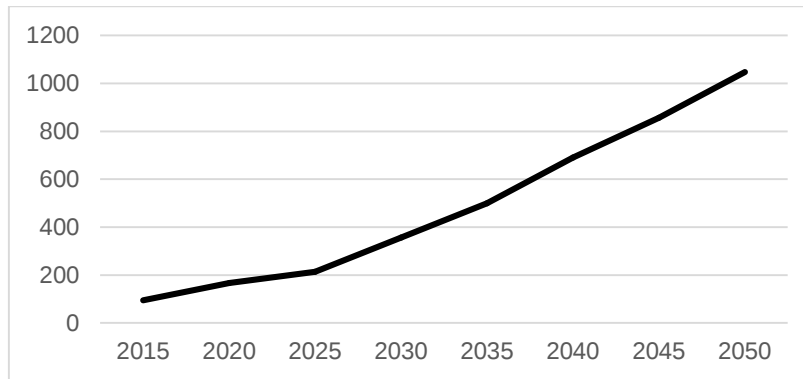


Рис. 8. Потужність встановлених сонячних електростанцій в ЄС (потужність, ГВт)
Джерело: побудовано за результатами авторського моделювання, з використанням даних [22]

Таблиця 2

Щорічний попит на матеріали в ЄС для сонячних панелей на 2030, 2040, 2050 роки

Матеріали Роки	Al (алюміній)	Cd (кадмій)	Cu (мідь)	Ga (галій)	Ge (германій)	In (індій)	Si (кремній)	Se (селен)	Ag (срібло)	Te (телур)
	в тоннах									
2030	200000	20	120000	2	5	10	71000	20	160	20
2040	315000	25	184600	3,2	7	16	91000	26	135	30
2050	410000	30	250000	5	10	20	109000	30	110	40

Джерело: побудовано за результатами авторського моделювання, з використанням даних [22]

Китай займає провідну позицію на всіх чотирьох етапах ланцюга постачання сонячних фотоелектричних систем. За оцінками, максимальна частка ЄС становить 6 % на етапі постачання сировини та 5 % на етапі переробки матеріалів, при цьому в самому ЄС практично відсутнє виробництво сонячних елементів і модулів. Покращення матеріалів може стати можливістю для підвищення конкурентоспроможності сонячної фотоелектричної промисловості в ЄС.

Щоб зменшити ризики, необхідно забезпечити диверсифікацію джерел постачання матеріалів для сонячних технологій. Імпорт кремнію для сонячних панелей становить 64 %, і забезпечення доступу до металевого кремнію з інших країн – таких як США, Бразилія та Норвегія – є критично важливим завданням для Європейського Союзу.

Покращення виробничих можливостей є ключовим, оскільки ЄС має низьку частку у виробництві сонячних елементів, хоча конкуренція з Китаєм є дуже висока. Переробка та повторне використання кремнію, заохочування науково-дослідницької діяльності – ще один крок до зниження ризиків.

Оцінювання ринку ЄС ґрунтується на аналізі економічної значущості та ризиків постачання. Економічна значущість визначається рівнем залежності кінцевих споживачів від конкретної сировини відповідно до її застосування. Ризики постачання оцінюються на основі концентрації виробництва сировини на рівні країн, шляхів її доставки до ЄС, а також з урахуванням екологічних факторів, можливостей переробки вторинної сировини, наявності замінників і рівня залежності від імпорту.

Багато критично важливих рідкісноземельних елементів концентруються у певних країнах: Китай постачає 98 % рідкісноземельних 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 [20].

ЄС у 2023 році сильно залежав від імпорту: магнію, германію та галію з Китаю; фероніобію з Бразилії; боратів з Туреччини. В загальному імпорт склав 94 % рідкісноземельних матеріалів, який надійшов з Китаю, Малайзії та Росії разом узятих. При тому, що обсяг імпорту критичної сировини з ЄС в період з 2019 по 2023 рік має динаміку до скорочення, за винятком природнього графіту. Так, на імпорт до ЄС магнію, феро-ніобію, боратів та галію, частка на основного партнера складає 75 % загального імпорту. Ціни на фероніобій, германій, борати та галій у 2023 році зросли, тоді як ціни на РЗЕ, магній, сурму та природний графіт знизилися [7].

Світова спільнота зрозуміла, що відновлювана енергетика за замовчуванням стала джерелом найдешевшої нової генерації електроенергії. Прогрес, досягнутий у 2023 році, є значним кроком на шляху до системи, заснованої на енергоефективності та відновлюваних технологіях. Досягнення мети

потреби відновлюваної енергетики вимагає, щоб глобальна потужність ВДЕ досягла 11,2 ТВт до 2030 року, додаючи в середньому 1044 ГВт нових потужностей щорічно до 2030 року. 8,5 ТВт буде забезпечено лише за рахунок сонячних фотоелектричних станцій та наземних вітрових електростанцій, згідно з перспективами світового енергетичного переходу, розробленими Міжнародним агентством з відновлюваної енергетики IRENA. У боротьбі із зміною клімату провідними країнами на COP 29 було прийнято рішення про виділення 300 млрд доларів кожного року до 2035 року на підтримку країн, що розвиваються, у їх діях по боротьбі з зміною клімату[2; 4].

У майбутньому частка зеленої енергетики буде і далі зростати, що призведе до зростання попиту на рідкісноземельні матеріали. Цей зростаючий попит може призвести до проблем з постачанням.

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.

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 [23].

З цього випливають наступні рекомендації з деякими зауваженнями:

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

– організувати складання основних компонентів для зменшення залежності від азійських постачальників;

– організувати покращення надійності та зниження витрат через наукові дослідження та розробки;

– удосконалити переробку кремнію;

– розширити джерела постачання матеріалів.

Висновки з проведеного дослідження. Рідкісноземельні елементи, зокрема неодим, диспрозій, тербій, кремній, індій та галій, відіграють ключову роль у розвитку сонячної та вітрової енергетики, що є основними напрямками відновлювальної енергетики. Їх стратегічне значення зростає у зв'язку з глобальним курсом на декарбонізацію та енергетичний перехід.

Зростання світового попиту на ці матеріали створює ризики нестабільності ланцюгів постачання, що зі свого боку може ускладнити впровадження відновлюваних технологій на широкому рівні та гальмувати формування стійкої енергетичної системи.

Висока концентрація видобутку та переробки рідкісноземельних елементів у Китаї підсилює залежність світового ринку від одного джерела, що є потенційно вразливим фактором для енергетичної безпеки, зокрема в межах ЄС.

Проаналізувавши ринок, доведено концентрацію виробництва рідкісноземельних матеріалів у Китаї, що зумовлює необхідність розроблення ефективних механізмів диверсифікації постачання. З огляду на це, важливим є залучення альтернативних джерел, а також впровадження сучасних технологій переробки для задоволення зростаючого попиту та формування стратегій сталого забезпечення потреб зеленої економіки.

Література

1. Новосад І., Руська Р., Пласконь С. Рідкоземельні метали: ключові компоненти сучасних технологій. *Інноваційна економіка*. 2024. № 1. С. 222-238.
2. Strengthening Climate Action Through Partnerships and Advocacy at COP29. *IRENA*. 2024. URL: <https://www.irena.org/News/articles/2024/Nov/Strengthening-Climate-Action-Through-Partnerships-and-Advocacy-at-COP29> (дата звернення: 11.01.2025).
3. Neodymium market: our top ten facts. *THUNDER SAID ENERGY*. 2021. URL: <https://thundersaidenergy.com/2021/11/18/neodymium-our-top-ten-facts/> (дата звернення: 11.01.2025).
4. Record Growth Drives Cost Advantage of Renewable Power. *IRENA*. 2024. URL: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Sep/Record-Growth-Drives-Cost-Advantage-of-Renewable-Power> (дата звернення: 11.01.2025).
5. Davies P., Westgate A. China dominates global investments in renewables energy. *Latham.London*. 2017. URL: <https://www.latham.london/2017/09/china-dominates-global-investments-in-renewable-energy/> (дата звернення: 11.01.2025).
6. State of the Energy Union Report 2024. *European Commission*. URL: https://energy.ec.europa.eu/publications/state-energy-union-report-2024_en (дата звернення: 11.01.2025).
7. International trade in critical raw materials. *Eurostat*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=International_trade_in_critical_raw_materials (дата звернення: 11.01.2025).

8. Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU. *European Commission*. 2020. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e167f11-077c-11eb-a511-01aa75ed71a1/language-en> (дата звернення: 11.01.2025).
9. Lazuen Jose, Baylis Robert, Merriman David. 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: 11.01.2025).
10. 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: 11.01.2025).
11. 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: 11.01.2025).
12. 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: 11.01.2025).
13. Pavel C., Blagoeva D. 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, 2017. 70 p.
14. Kühnbaach Matthias, Pisula Stefan, Bakk Anke. How much energy autonomy can decentralised photovoltaic generation provide? A case study for Southern Germany. *Applied Energy*. 2020. Vol. 280. 115947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115947>.
15. Pathways for Solar Photovoltaics / Jean J., Brown P. R., Jaffe R. L., Buonassisi T., Bulović V. *Energy and Environmental Science*. 2015. Vol. 8. No. 4. P. 1200-1219. DOI: <https://doi.org/10.1039/C4EE04073B>.
16. Solar Companies Are Scrambling to Find a Critical Raw Material. *Bloomberg*. 2017. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-11-13/solar-companies-grapple-with-unexpected-shortage-of-key-material> (дата звернення: 11.01.2025).
17. Global and China Polysilicon Industry Report 2019-2023. *Research and Markets*. 2019. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4771599/> (дата звернення: 11.01.2025).
18. Equipment Manufacturers. *BloombergNEF*. 2020. URL: <https://about.bnef.com/> (дата звернення: 11.01.2025).
19. Garrett P., Rønde K. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V112-3.45MW Wind Plant. 2015. 129 p.
20. 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: 11.01.2025).
21. 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: 11.01.2025).
22. Nedal T. Nassar, David R. Wilburn, Thomas G. Goonan. Byproduct metal requirements for U.S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios. *Applied Energy*. 2016. Volume 183. P. 1209-1226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.062>.
23. 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: 11.01.2025).

References

1. Novosad, I., Ruska, R. and Plaskon, S. (2024), "Rare earth metals: key components of modern technologies", *Innovatsiina ekonomika*, no. 1, pp. 222-238.
2. IRENA (2024), Strengthening Climate Action Through Partnerships and Advocacy at COP29, available at: <https://www.irena.org/News/articles/2024/Nov/Strengthening-Climate-Action-Through-Partnerships-and-Advocacy-at-COP29> (access date January 11, 2025).
3. THUNDER SAID ENERGY (2021), Neodymium market: our top ten facts, available at: <https://thundersaidenergy.com/2021/11/18/neodymium-our-top-ten-facts/> (access date January 11, 2025).
4. IRENA (2024), Record Growth Drives Cost Advantage of Renewable Power, available at: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Sep/Record-Growth-Drives-Cost-Advantage-of-Renewable-Power> (access date January 11, 2025).

5. Davies, P. and Westgate, A. (2017), "China dominates global investments in renewables energy", *Latham. London*, available at: <https://www.latham.london/2017/09/china-dominates-global-investments-in-renewable-energy/> (access date January 11, 2025).
6. European Commission (2024), State of the Energy Union Report 2024, available at: https://energy.ec.europa.eu/publications/state-energy-union-report-2024_en (access date January 11, 2025).
7. Eurostat (2024), International trade in critical raw materials, available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=International_trade_in_critical_raw_materials (access date January 11, 2025).
8. European Commission (2020), 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 January 11, 2025).
9. Lazuen, J., Baylis, R. and Merriman, D. (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 January 11, 2025).
10. 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 January 11, 2025).
11. 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 January 11, 2025).
12. 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 January 11, 2025).
13. 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, 70 p.
14. Kühnbaach, M., Pisula, S. and Bekk, A. (2020), "How much energy autonomy can decentralised photovoltaic generation provide? A case study for Southern Germany", *Applied Energy*, Vol. 280, 115947, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115947>.
15. Jean, J., Brown, P.R., Jaffe, R.L. et al. (2015), "Pathways for Solar Photovoltaics", *Energy and Environmental Science*, Vol. 8, No. 4, pp. 1200-1219.
16. Bloomberg (2017), Solar Companies Are Scrambling to Find a Critical Raw Material, available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-11-13/solar-companies-grapple-with-unexpected-shortage-of-key-material> (access date January 11, 2025).
17. Research and Markets (2019), Global and China Polysilicon Industry Report 2019-2023, available at: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4771599/> (access date January 11, 2025).
18. BloombergNEF (2020), Equipment Manufacturers., available at: <https://about.bnef.com/> (access date January 11, 2025).
19. Garrett, P. and Rønde, K. (2015), Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V112-3.45MW Wind Plant, 129 p.
20. 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 January 11, 2025).
21. 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 January 11, 2025).
22. Nassar, N.T., Wilburn, D.R. and Goonan, T.G. (2016), "Byproduct metal requirements for U.S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios", *Applied Energy*, Volume 183, pp. 1209-1226, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.062>.
23. 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 January 11, 2025).

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

РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ В СИСТЕМАХ СОНЯЧНОЇ ТА ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Мета. Проведення комплексного аналізу шляхів постачання рідкісноземельних елементів в системах сонячної та вітрової енергетики та прогнозування розвитку 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 рідкісноземельних елементів, а також статистичний та графічний методи для аналізу ринку рідкісноземельних елементів та прогнозування попиту та пропозиції за допомогою часових рядів. Графіки були використані для візуалізації цих даних.

Результати дослідження. Встановлено, що рідкісноземельні елементи (неодим, диспрозій, тербій, кремній, індій, галій), набуваючи все більшого стратегічного значення у відновлюваній сонячній та вітровій енергетиці, спричиняють зростання глобального попиту, водночас ускладнюючи забезпечення стабільних поставок. Це, у свою чергу, ускладнює побудову більш безпечної та декарбонізованої енергетичної системи. Зазначені виклики є надзвичайно складними, особливо з огляду на швидкоплинні зміни геополітичного контексту та безпрецедентні кризи, що постають перед ЄС.

Проаналізувавши ринок, доведено концентрацію виробництва рідкісноземельних матеріалів у Китаї, що зумовлює необхідність розроблення ефективних механізмів диверсифікації постачання. З огляду на це, важливим є залучення альтернативних джерел, а також впровадження сучасних технологій переробки для задоволення зростаючого попиту та формування стратегій сталого забезпечення потреб зеленої економіки.

Наукова новизна результатів дослідження. Обґрунтовано концепцію комплексного аналізу шляхів постачання та використання рідкісноземельних елементів у системах відновлюваної енергетики, зокрема сонячній та вітровій, що, на відміну від існуючих підходів, дає змогу не лише визначити їхню критичну роль у забезпеченні технологічного розвитку в умовах переходу до кліматично нейтральної економіки, а й виявити потенційні загрози стабільності постачання та сформувати стратегії їхньої мінімізації. Удосконалено методичні підходи до прогнозування динаміки розвитку світового ринку рідкісноземельних матеріалів, що враховують вплив новітніх екологічних трендів та трансформацій глобальної енергетичної політики. Набуло подальшого розвитку наукове розуміння структурно-функціональних аспектів логістичних мереж постачання рідкісноземельних елементів.

Практична значущість результатів дослідження. Результати проведеного дослідження мають вагомое практичне значення, оскільки можуть бути використані для обґрунтування аналізу та прогнозування логістичних шляхів постачання рідкісноземельних елементів, а також для вирішення питань, пов'язаних із майбутніми викликами та посиленням конкуренції за стратегічні ресурси.

Ключові слова: рідкісноземельні елементи, критично важливий матеріал, сонячна енергетика, вітрова енергетика, статистичний метод, прогнозування.

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

RARE EARTH METALS IN SOLAR AND WIND ENERGY SYSTEMS

Purpose. To conduct a comprehensive analysis of the supply routes for rare earth elements in solar and wind energy systems and to forecast the development of the market for these elements in the current conditions arising from the war and other factors.

Methodology of research. In the process of writing the article, the scientific research methodology was used 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 established that rare earth elements (neodymium, dysprosium, terbium, silicon, indium, gallium), which are becoming increasingly strategically important in renewable solar and wind energy, are driving global demand while making it difficult to ensure stable supplies. This, in turn, makes it harder to build a more secure and decarbonised energy system. These challenges are extremely complex, especially given the rapidly changing geopolitical context and the unprecedented crises facing the EU.

The market analysis proved the concentration of rare earth materials production in China, which necessitates the development of effective mechanisms for diversifying supplies. In view of this, it is important to attract alternative sources, as well as to introduce modern processing technologies to meet the growing demand and develop strategies for sustainable meeting the needs of the green economy.

Originality. The concept of a comprehensive analysis of the ways of supply and use of rare earth elements in renewable energy systems, in particular solar and wind, is substantiated, which, unlike existing approaches, allows not only to determine their critical role in ensuring technological development in the transition to a climate-neutral economy, but also to identify potential threats to the stability of supply and formulate strategies to minimize them. Methodological approaches to forecasting the dynamics of the global rare earth materials market were improved, taking into account the impact of the latest environmental trends and transformations in global energy policy. The scientific understanding of the structural and functional aspects of logistics networks for the supply of rare earth elements was further developed.

Practical value. The results of this study are of significant practical importance, as they can be used to substantiate the analysis and forecasting of logistics routes for the supply of rare earth elements, as well as to address issues related to future challenges and increased competition for strategic resources.

Key words: rare earth elements, critical material, solar energy, wind energy, statistical method, forecasting.