

Ольга ВЕЛИКА

старший викладач

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

м. Одеса, Україна

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0435-743X>

Анастасія ФЕСЬ

здобувач першого рівня освіти

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

м. Одеса, Україна

Діана СУРСУ

здобувач першого рівня освіти

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

м. Одеса, Україна

СТАЛИЙ РОЗВИТОК: ПРОБЛЕМИ, КОНФЛІКТИ ТА МАЙБУТНЄ ЕНЕРГЕТИКИ

Сталий розвиток, проголошений Організацією Об'єднаних Націй стратегічним шляхом до порятунку планети, супроводжується низкою парадоксів та викликів. З одного боку, перехід до «зеленої» енергетики є критично необхідним для скорочення викидів парникових газів та подолання наслідків зміни клімату. З іншого боку, самі ці «зелені» технології, такі як сонячні панелі, вітрові турбіни та електромобілі, створюють нові екологічні та ресурсні загрози.

Глобальний перехід на відновлювані джерела енергії зіткнувся з значним викликом – гострою нестачею ключових мінералів і металів.

Згідно зі звітом Всесвітнього банку, для повного переходу на «зелену» енергетику до 2050 року людству знадобиться видобути більше літію, кобальту і міді, ніж було видобуто за всю попередню історію цивілізації. Тобто, стрімкий перехід на відновлювані джерела енергії створює безпрецедентний попит на особливу групу металів і мінералів. Ці матеріали стали фундаментом для виробництва ключових технологій майбутнього – від сонячних панелей і вітрогенераторів до акумуляторів електромобілів. Згідно з дослідженнями, для досягнення цілей Паризької угоди про клімат (утримання глобального потепління в межах 2°C) світова потреба в цих ресурсах до 2040 року збільшиться в чотири рази порівняно з 2020 роком.

Європейський Союз, який активно просуває зелену енергетику, до 2050 року буде потребувати у 60 разів більше літію і у 15 разів більше кобальту лише для задоволення потреб у акумуляторах електромобілів і системах зберігання енергії. Потреба в рідкоземельних елементах збільшиться у десять разів.

Попри активне просування принципів повторного використання, переробка багатьох критичних мінералів залишається економічно неефективною. Наприклад вольфрам, індій і кобальт.

Це означає, що навіть при ідеальних умовах 50 - 90% попиту на ці матеріали як і раніше доводиться покривати за рахунок первинного видобутку, що суперечить принципам сталого розвитку.

Також, деякі матеріали використовуються в настільки малих кількостях, що їх переробка нерентабельна. Наприклад Ніобій. У мікролегованих сталях його концентрація – всього 0,1% [1].

Парадоксально, але виробництво обладнання для відновлюваної енергетики поки що сильно залежить від викопного палива, створюючи так званий «вуглецевий борг».

Виготовлення сонячних панелей та вітрогенераторів вимагає значних енерговитрат. Наприклад, виробництво 1 МВт сонячних панелей у Китаї (де переважає вугільна енергетика) призводить до викидів близько 40 тонн CO₂. Для порівняння: європейські виробники, які використовують «чистіші» джерела енергії, мають на 30 - 50% нижчий вуглецевий слід. Проте саме Китай зараз виробляє понад 80 % світових сонячних панелей, що створює парадокс «зеленої» енергетики: її глобальне розширення тимчасово підвищує викиди через вуглецево-інтенсивне виробництво. Сучасним сонячним електростанціям потрібно 2 - 3 роки роботи, щоб компенсувати вуглецевий слід від їх виробництва.

В останні роки Китай прагне знизити залежність від вугілля і досягти вуглецевої нейтральності. На кінець 2023 року, сукупна потужність вітрових і сонячних електростанцій у країні склала 758 ГВт, а до 2030 року планується збільшити цей показник до 1200 ГВт.

Однак у міру виведення з експлуатації застарілих енергооб'єктів обсяги відходів стрімко зростають. Вже зараз значна частина установок наближається до кінця терміну служби. Згідно з даними видання Science and Technology Daily, до 2030 року Китаю знадобиться переробити близько 1,5 млн тонн сонячних модулів, а до 2050 року цей показник може досягти 20 млн тонн.

Для вирішення цієї проблеми Китай розробить нові галузеві стандарти і нормативи, що регламентують процеси виведення з експлуатації, демонтажу і переробки обладнання. За заявою Державного комітету з розвитку і реформ, до 2030 року в країні має бути сформована «в цілому зріла» система повного циклу утилізації вітрогенераторів і сонячних панелей.

За прогнозами Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), до 2050 року щорічний обсяг відходів тільки від сонячних електростанцій може досягти 212 млн тонн [2].

70% імпорту рідкоземельних елементів до США у 2020-2023 роках припадало саме на Китай. Останній контролює 90% світового виробництва очищених рідкоземельних металів, володіючи найбільшими потужностями з їх переробки.

У відповідь на торгові обмеження з боку США (мита Трампа) Китай запровадив експортні обмеження на сім рідкоземельних елементів, тимчасово скоротивши їх поставки [3].

Україна в цій ситуації розглядається як важливий партнер завдяки найбільшим у Європі запасам рідкоземельних елементів. І угоду з США про співпрацю в цій сфері вже укладено [4].

Також, США ініціювали Mineral Security Partnership (MSP) — альянс із 14 країн та ЄС, спрямований на зміцнення ланцюжків постачання. Туди входить і Україна. Його мета — сприяти створенню безпечних, різноманітних та стійких ланцюжків поставок критично важливих мінералів.

Механізм регулювання викидів вуглецю на кордоні ЄС (СВАМ) — це інструмент Європейського Союзу, який дозволяє встановити справедливую ціну на вуглець, що викидається під час виробництва вуглецеємних товарів, які постачаються до ЄС, а також стимулювати більш чисте промислове виробництво в країнах, що не входять до ЄС [5].

Тобто, це вуглецевий податок на імпорт в ЄС для товарів з високим рівнем викидів. Його мета — запобігти «витоку вуглецю», коли компанії переносять виробництво до країн з більш м'яккою кліматичною політикою.

Індія висловлює занепокоєння з приводу потенціалу СВАМ діяти як торговельний бар'єр, який може перешкоджати економічному зростанню. Однак це також поштовх для введення Індією власного податку на викиди вуглецю.

Уряд Китаю також висловив занепокоєння у Світовій організації торгівлі та на міжнародних кліматичних самітах, таких як COP29. Китай і зараз закликає до подальших переговорів із ЄС для вирішення проблем із СВАМ. І справді, СВАМ може серйозно вплинути на економіку африканських країн. Це збільшить вартість його експорту, і зменшить конкурентоспроможність.

Для Мозамбіку, де 18.9% експорту посідає алюміній, наслідки будуть особливо важкими. Втрати оцінюються у \$1–5 млрд, а ВВП може скоротитися на 2.5%.

Тож, СВАМ може посилити розрив між розвиненими країнами, та країнами, що розвиваються. Це суперечить принципу «загальної, але диференційованої відповідальності» Паризької угоди [7].

Водень — це чиста альтернатива метану, також відомому як природний газ. Його можна виробляти з різних ресурсів (природний газ, ядерна енергія, біогаз, ВЕ). Завдання полягає в тому, щоб використовувати водень у великих масштабах. Блакитний водень виробляється з використанням природного газу як сировини. Недоліком блакитного водню є вироблення вуглецю як побічного продукту. Зелений водень виробляється шляхом використання електрики для живлення електролізера, який розщеплює водень з молекул води. Цей процес виробляє чистий водень без шкідливих побічних продуктів. Однак і вартість у цих видів водню різна.

Також, необхідність модернізації інфраструктури і технологічні складнощі зберігання і транспортування роблять впровадження водню складнішим [8].

Термоядерний синтез — це процес, у якому легкі атомні ядра зливаються у більш важкі, виділяючи дуже багато енергії. Саме так «працюють» зірки, включаючи наше Сонце.

Плюси цієї методики: Необмежене виробництво енергії, не схильне до місцевих або сезонних коливань; Відсутність викидів парникових газів; Відсутність аварій, таких як розплавлення чи вибухи; Ніяких радіоактивних відходів; Ризик поширення відсутній або незначний [9].

Мінуси методики: Проблема стійкості реакції – жодна установка не пододала поріг тривалої стабільної роботи; Навіть експериментальний реактор ITER вимагає \$ 20 млрд і кооперації багатьох країн; Буде готовий не раніше 2050 року, а може, і взагалі ніколи.

Нещодавні випробування на установці MTFCA – ключовому компоненті майбутнього термоядерного реактора ITER – продемонстрували значний прогрес у створенні системи нагріву плазми. Суть досягнення полягає у успішному тестуванні системи високовольтного утримання у вакуумній камері. Особливо важливо, що аналогічні результати були отримані в умовах, максимально наближених до робочих. При цьому установка успішно витримувала задані параметри протягом більше години – саме такої тривалості вимагають робочі цикли ITER.

Отримані результати підтверджують правильність обраних технічних рішень та готовність системи до наступних етапів тестування. Після інтеграції джерела пучка MTFCA стане повноцінним прототипом нагрівальної системи для ITER, здатної генерувати та прискорювати негативні іони водню з подальшою їх нейтралізацією.

Перехід до відновлюваної енергетики виявляється складним багаторівневим кризисом, де екологічні амбіції стикаються з суворою реальністю глобальної економіки. За фасадом «чистих» технологій ховається ланцюг взаємопов'язаних проблем: від вичерпання критичних ресурсів до нових форм геополітичного протистояння. Стрімке зростання попиту на літій, кобальт і рідкоземельні метали перемальовує карту світової влади, концентруючи вплив у руках Китаю. Навіть спроби Заходу знизити залежність через міжнародні альянси упираються у десятиліття відставання й неймовірні витрати.

Екологічний парадокс поглиблюється тим, що виробництво «зелених» технологій досі залежить від викопного палива, а їхній вуглецевий слід окупається лише через роки експлуатації. Майбутні гори відходів шокують: до 2050 року світ може зіткнутися з сотнями мільйонів тонн сонячних панелей і вітрогенераторів.

Кліматичні ініціативи на кшталт СВМ, покликані прискорити декарбонізацію, на практиці поглиблюють прірву між багатими та бідними країнами. Для Африки, де економіка залежить від експорту сировини, ці заходи загрожують колапсом ринків і поглибленням боргової залежності, а обіцянки «справедливого переходу» залишаються порожніми гаслами без передачі технологій і необхідного фінансування. Навіть прориви у сфері водню чи термоядерного синтезу, як показали випробування MTFCA, не стануть панацеєю. Їхня комерціалізація – справа майбутнього.

Таким чином, «зелена революція» сьогодні нагадує гонку без фінішної прямої, де кожна вирішена проблема породжує нові ризики. Успіх переходу залежить не від кількості сонячних панелей, а від здатності людства

перебудувати весь ланцюг – від видобутку сировини до переробки відходів – у рамках глобальної кооперації. Без цього ми ризикуємо замінити одну форму нестійкості на іншу, де кліматичні цілі будуть досягнуті ціною нових втрат.

Список використаних джерел:

1. The World Bank. 2022. Squaring the Circle: Policies from Europe's Circular Economy Transition. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099425006222229520/pdf/P174596125fa8105a191c51fb22f0596fd1.pdf> (дата звернення: 19.12.2024).
2. Stanway, D. (2023, August 17). China to set up solar, wind recycling system as waste volumes surge. Reuters. URL: <https://www.reuters.com/sustainability/china-set-up-solar-wind-recycling-system-waste-volumes-surge-2023-08-17/> (дата звернення: 19.12.2024).
3. Venditti, B. (2025, May 1). Charted: Where the U.S. gets its rare earths from. Visual Capitalist. URL: <https://elements.visualcapitalist.com/charted-where-the-u-s-gets-its-rare-earths-from/> (дата звернення: 19.12.2024).
4. Peachey, C. (2025, May 9). Exploring US efforts to find a secure supply of rare earth elements. MiningTechnology. URL: <https://www.mining-technology.com/analysis/exploring-us-efforts-to-find-a-secure-supply-of-rare-earth-elements/> (дата звернення: 19.12.2024).
5. European Commission. (2025, March 28). Carbon Border Adjustment Mechanism. URL: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en (дата звернення: 19.12.2024).
6. Yin, I. (2025, April 17). China seeks talks with EU over CBAM concerns, opposes current mechanism. S&P Global Commodity Insights. URL: <https://cilive.com/commodities/metals-mining/news-and-insight/041725-china-seeks-talks-with-eu-over-cbam-concerns-opposes-current-mechanism> (дата звернення: 19.12.2024).
7. Baker, P., Beeharry, T. Z. B., Le, L., Roy, R., & Quiles, P. (2022, November). Designing an African response to Carbon Border Adjustment Mechanisms. Paper presented at the African Economic Conference 2022: Supporting Climate Smart Development in Africa. URL: <https://www.tradeeconomics.com/wp-content/uploads/Designing-an-African-response-to-Carbon-Border-Adjustment-Mechanisms.pdf> (дата звернення: 19.12.2024).
8. National Grid. (2021, September 27). The future of hydrogen. URL: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-is-hydrogen> (дата звернення: 19.12.2024).
9. International Atomic Energy Agency. Basic fusion physics. URL: <https://www.iaea.org/topics/energy/fusion/background> (дата звернення: 19.12.2024).
10. Consorzio RFX. (2025, May 5). A successful round of tests for MITICA. ITER. URL: <https://www.iter.org/node/20687/successful-round-tests-mitica> (дата звернення: 19.12.2024).