



DOI: 10.58423/2786-6742/2026-13-177-194
УДК 332.1:669.85/.86:502.131.1

Оксана КУШНІРЕНКО

доктор економічних наук, професор,
провідний науковий співробітник відділу торговельної та промислової політики
Державної установи “Інститут економіки та прогнозування
Національна академія наук України”
м. Київ, Україна

ORCID ID: [0000-0002-3853-584X](https://orcid.org/0000-0002-3853-584X)

Scopus Author ID: [57211200565](https://scopus.org/authorid/57211200565)

e-mail: kushnksena@gmail.com

(Corresponding author)

Мирон КОВАЛЬЧУК

доктор геологічних наук, професор,
завідувач відділу літології Інституту геологічних наук
Національна академія наук України
м. Київ, Україна

ORCID ID: [0000-0001-9265-9707](https://orcid.org/0000-0001-9265-9707)

Scopus Author ID: [56358899000](https://scopus.org/authorid/56358899000)

Лілія ВЕНГЕР

кандидат економічних наук,
старший науковий співробітник відділу економіки енергетики та клімату
Державної установи “Інститут економіки та прогнозування
Національна академія наук України”
м. Київ, Україна

ORCID ID: [0000-0003-0554-7438](https://orcid.org/0000-0003-0554-7438)

ВИЛУЧЕННЯ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ТЕХНОГЕННИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

Анотація. Стаття присвячена проблематиці вилучення рідкісноземельних елементів (РЗЕ) із техногенних відходів, зокрема хвостів збагачення титано-цирконієвих руд, у контексті формування та реалізації внутрішніх ресурсів територіальних громад. Автори підкреслюють стратегічне значення РЗЕ для розвитку високотехнологічних галузей, енергетичної та оборонної промисловості, а також актуальність пошуку альтернативних джерел їх отримання у зв'язку з глобальним дефіцитом і геополітичними ризиками. Накопичення техногенних відвалів і побічних продуктів гірничо-металургійного комплексу створює суттєві екологічні, соціальні та економічні ризики, водночас відкриваючи можливості для ефективного використання внутрішніх ресурсів на рівні громад. У роботі обґрунтовано, що вилучення РЗЕ з техногенних відходів може стати концептуальною основою економіко-екологічного розвитку територіальних громад, сприяти досягненню Цілей сталого



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



розвитку (ЦСР) та підтримці повоєнного відновлення України. Особливий акцент зроблено на інтеграції технологічних, економічних, соціальних і управлінських складових у рамках зеленої моделі регіонального розвитку з науковим супроводом інститутів академії НАН України та профільних університетів. Наведено приклади національних та зарубіжних досліджень, що підтверджують ефективність і перспективність використання хвостів збагачення як вторинного джерела РЗЕ, а також аналізуються стратегічні документи ООН, ЄС та України, які підкреслюють важливість розвитку циркулярної економіки, диверсифікації джерел критичних матеріалів та оптимізації ресурсного потенціалу на місцевому рівні. Результати дослідження демонструють, що комплексний підхід до переробки техногенних відходів здатен поєднати екологічні, економічні та технологічні вигоди, підвищити ресурсну самодостатність громад і сприяти сталому розвитку регіонів України.

Ключові слова: рідкісноземельні елементи, техногенні відходи, хвости збагачення титан-цирконієвих руд, циркулярна економіка, сталий розвиток, екологічна безпека, соціально-економічний ефект

JEL Classification: Q32, Q53, Q56, O13

Absztrakt. A tanulmány a ritkaföldfémek technogén hulladékokból, különösen a titán-cirkónium ércek dúsítási meddőiből történő kinyerésének problémakörével foglalkozik, a kistérségek belső erőforrásainak kialakítása és hasznosítása összefüggésében. A szerzők hangsúlyozzák a ritkaföldfémek stratégiai jelentőségét a magas technológiai színvonalú ágazatok, az energetikai és a védelmi ipar fejlődése szempontjából, valamint kiemelik az alternatív beszerzési források keresésének aktualitását a globális hiány és a geopolitikai kockázatok miatt. A technogén meddőhányók és a bányászati-kohászati komplexum melléktermékeinek felhalmozódása jelentős környezeti, társadalmi és gazdasági kockázatokot teremt, ugyanakkor lehetőséget nyit a belső erőforrások hatékony hasznosítására kistérségi szinten. A tanulmány megalapozza azt az állítást, hogy a ritkaföldfémek technogén hulladékokból történő kinyerése a kistérségek gazdasági-ökológiai fejlődésének koncepcionális alapjává válhat, hozzájárulhat a fenntartható fejlődési célok eléréséhez, valamint Ukrajna háború utáni újjáépítésének támogatásához. Külön hangsúlyt kap a technológiai, gazdasági, társadalmi és irányítási összetevők integrációja a regionális fejlődés zöld modellje keretében, az Ukrán Nemzeti Tudományos Akadémia intézeteinek és a profil szerinti egyetemeknek a tudományos támogatásával. A tanulmány nemzeti és külföldi kutatások példáit is bemutatja, amelyek igazolják a dúsítási meddők ritkaföldfémek másodlagos forrásoként való felhasználásának hatékonyságát és perspektivikusságát. Emellett elemzi az ENSZ, az Európai Unió és Ukrajna stratégiai dokumentumait, amelyek kiemelik a körforgásos gazdaság fejlesztésének, a kritikus nyersanyagforrások diverzifikációjának, valamint a helyi szintű erőforrás-potenciál optimalizálásának fontosságát. A kutatás eredményei azt mutatják, hogy a technogén hulladékok feldolgozásának komplex megközelítése képes összekapcsolni a környezeti, gazdasági és technológiai előnyöket, növelni a kistérségek erőforrás-önellátását, valamint elősegíteni Ukrajna régióinak fenntartható fejlődését.

Kulcsszavak: ritkaföldfémek, technogén hulladékok, titán-cirkónium ércek dúsítási meddői, körforgásos gazdaság, fenntartható fejlődés, környezeti biztonság, társadalmi-gazdasági hatás.

Abstract. The article deals with the issue of extracting rare earth elements (REE) from industrial waste, specifically from the tailings of titanium-zirconium ore processing, in the context of developing and utilizing the internal resources of local communities. The authors emphasize the strategic importance of REE for the development of high-tech sectors, the energy and defense industries, as well as the relevance of searching for alternative sources of REE due to global deficit and geopolitical risks. The accumulation of industrial waste dumps and by-products from the mining and metallurgical complex poses significant environmental, social, and economic risks, while creating opportunities for the effective exploitation of domestic resources at the community level. It is argued



that the extraction of REEs from technogenic waste could serve as a conceptual basis for the economic and environmental development of local communities, contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs), and support Ukraine's post-war recovery. Particular focus is placed on the integration of technological, economic, social, and governance components within the framework of a green model of regional development, supported by scientific support from the institutes of the National Academy of Sciences of Ukraine and specialized universities. Examples of national and international studies are provided that confirm the effectiveness and potential of using tailings as a secondary source of critical raw materials. The strategic documents from the UN, the EU, and Ukraine are analyzed, which emphasize the importance of developing a circular economy, diversifying sources of critical materials, and optimizing resource potential at the local level. The results of the research demonstrate that a comprehensive approach to the processing of industrial waste can combine environmental, economic, and technological benefits, increase the resource self-sufficiency of communities, and contribute to the sustainable development of Ukraine's regions.

Keywords: Rare earth elements (REE), technogenic waste, titanium-zirconium ore tailings, circular economy, sustainable development, environmental safety, socio-economic effect.

Постановка проблеми. Рідкісноземельні елементи (РЗЕ) належать до стратегічних мінеральних ресурсів, що в контексті глобального зростання потреб електроніки, альтернативної енергетики, автомобілебудування, відіграє все більш вагомую роль як для традиційних промислових виробництв, так і для розвитку сучасних високотехнологічних виробництв. Глобальний попит на РЗЕ демонструє стійку тенденцію до зростання, поступово перевищуючи наявні обсяги їх пропозиції. В умовах загострення глобальної конкуренції за доступ до критичних РЗЕ обмеженість традиційної мінерально-сировинної бази посилює ризики ресурсної залежності та унеможливорює повне задоволення зростаючого попиту в середньостроковій перспективі, що, у свою чергу, актуалізує необхідність наукових досліджень в сфері розроблення ефективних технологій вилучення РЗЕ з альтернативних, передусім вторинних, джерел як інструменту забезпечення ресурсної безпеки територіальних громад.

В сучасній літературі більшість наукових досліджень у сфері РЗЕ зосереджені переважно на дослідженні геологічних умов залягання РЗЕ, мінералого-геохімічних дослідженнях рідкісноземельного зруденіння, визначенні їх вмісту, картуванні поширення РЗЕ в межах родовищ різних корисних копалин, обґрунтуванні стратегічного значення РЗЕ для сучасних технологій і економіки країни, технологіях вилучення РЗЕ та первинної переробки, що супроводжується високими екологічними ризиками й значним ресурсним навантаженням. [1, 2, 3].

Водночас, сталий розвиток та принципи ресурсозбереження зумовлюють зростаючу увагу суспільства до вирішення актуальної наукової проблеми накопичення техногенних відвалів і відходів у межах територіальних громад України, що створює екологічні (деградація ґрунтів, забруднення поверхневих і ґрунтових вод, атмосферного повітря), соціальні (загрозу здоров'ю населення, зростання соціальної напруги, погіршення якості життя) та економічні (втрати продуктивних земель, додаткові витрати на рекультивацию та управління



відходами, зниження інвестиційної привабливості регіонів) загрози. Вилучення РЗЕ з відвалів і техногенних відходів може стати стратегічним ресурсом для України, але лише за умови екологічного балансу, тобто одночасного впровадження технологій вилучення та систем компенсаційних заходів. Це дозволить громадам отримати вигоди від зменшення відвалів, техногенних відходів і нових робочих місць, мінімізуючи ризики для довкілля [4].

Впровадження такої моделі тісно пов'язано з економіко-екологічного просторового розвитку, що передбачає раціональне використання внутрішніх ресурсів територіальних громад шляхом їх повторного залучення у господарський обіг, мінімізацію антропогенного навантаження на довкілля та формування передумов для сталого, ресурсоефективного зростання, її відповідність Цілям сталого розвитку (ЦСР) [5]

Для України, яка володіє значним ресурсним потенціалом рідкісноземельних елементів (за окремими оцінками - близько 5% світових запасів критичної сировини та понад 20 тис. родовищ, що охоплюють 116 видів мінеральних ресурсів) [6], розвиток видобувного сектору, а також активізація переробки техногенних відвалів та відходів набувають стратегічного значення в контексті досягнення ЦСР [7]. Передусім це ЦСР 8 (гідна праця та економічне зростання) через створення нових робочих місць в гірничо-металургійному комплексі; ЦСР 9 (промисловість, інновації та інфраструктура) завдяки впровадженню інноваційних технологій переробки та видобування критичних матеріалів; ЦСР 12 (відповідальне споживання та виробництво) через повторне використання ресурсів і зменшення відходів; ЦСР 7 (доступна та чиста енергія) для розвитку акумуляторних технологій і відновлюваної енергетики, оскільки такі хімічні елементи як літій, кобальт, марганець, свинець, графіт; а також ЦСР 13 (боротьба зі зміною клімату) шляхом зниження екологічного навантаження через вторинну переробку сировини. Крім того, ефективне управління ресурсами сприятиме досягненню ЦСР 16 (мир, справедливість та сильні інститути) через підвищення прозорості у сфері надрокористування та ЦСР 11 (сталий розвиток громад), оскільки доходи від ресурсів можуть бути спрямовані на відновлення інфраструктури та підвищення якості життя населення. Таким чином, інтеграція циркулярних підходів до технологій видобування критичних мінералів формує для територіальних громад України довгострокову модель сталого розвитку.

У багатьох регіонах України акумульовано значні обсяги техногенних накопичень (хвостів збагачення, відвалів і промислових відходів), що сформувалися внаслідок діяльності гірничодобувної та переробної промисловості. За сучасних умов їх доцільно розглядати не лише як джерело екологічних ризиків, а як вторинну ресурсну базу, зокрема щодо вилучення дефіцитних РЗЕ. Раціональне залучення таких ресурсів у господарський обіг створює передумови для підвищення економічної самодостатності територіальних громад, розвитку локальних виробничих систем і зниження антропогенного навантаження на довкілля.



Переробка техногенних відходів забезпечує трансформацію екологічних загроз у фактори розвитку: зменшення забруднення компонентів довкілля супроводжується формуванням доданої вартості за рахунок вилучення цінних компонентів; рекультивація порушених територій відкриває можливості їх подальшого господарського використання; створення переробних потужностей стимулює зайнятість і розвиток підприємництва; використання локальних вторинних ресурсів знижує імпорту залежність; впровадження сучасних технологій переробки сприяє інноваційному розвитку та посиленню науково-технологічного потенціалу регіонів.

Водночас, нестача ефективних механізмів зменшення екологічного навантаження в громадах, відсутність практик повторного вилучення РЗЕ із техногенних відвалів та відходів як альтернативи традиційному видобутку, а також низький рівень екологічної свідомості перешкоджають реалізації принципів сталого розвитку в регіонах України. До того ж посилення євроінтеграційних прагнень України актуалізує необхідність впровадження технологій циркулярної економіки, що дозволяють підвищити ефективність використання сировинних ресурсів з мінімізацією екологічного навантаження в громадах та залучити додаткові ресурси до регіональної економіки без розширення видобутку корисних копалин, що і визначає актуальність теми дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових дослідженнях українських та зарубіжних науковців значна увага приділяється екологічним аспектам діяльності гірничодобувної промисловості із урахуванням економічних, екологічних і соціальних складових сталого розвитку територіальних громад. О. Бобровська та інші дослідники в своїй монографії обґрунтували комплексний підхід до розуміння потенціалу територій як багатовимірної системи, що включає природно-ресурсні, економічні, соціальні та управлінські компоненти, взаємодія яких визначає можливості сталого розвитку громад.

Науковці Інституту регіональних досліджень імені М. І. Долишнього акцентують увагу на необхідності переходу від екстенсивного використання ресурсів до їх раціонального та інноваційного залучення, зокрема через активізацію внутрішніх резервів територій і підвищення ефективності публічного управління в умовах децентралізації [9]. У цьому контексті використання техногенних відходів, зокрема хвостів гірничо-збагачувальних комбінатів зі збагачення титан-цирконієвих руд як джерела рідкісноземельних елементів, може розглядатися в якості інструменту актуалізації прихованого ресурсного потенціалу територій, що відповідає концепції ендегенного розвитку та сприяє формуванню економічної самодостатності й екологічної збалансованості громад. Соціально-економічний розвиток регіонів України в умовах воєнних загроз не відповідає принципам ЦСР, адже стратегії переходу регіонів до сталого розвитку не націлені на пошук внутрішніх джерел



ресурсного забезпечення. Тому важливим є визначення потенціалу місцевого самоврядування в забезпеченні сталого розвитку регіону, розкриття підходів до його підвищення і управління раціональним використанням ресурсів для активізації процесів розвитку регіонів [10].

Формуванні екологічно дружньої моделі соціально-економічного розвитку територіальних громад передбачає взаємодію «знизу-вгору», за якої залучення місцевих стейкхолдерів та врахування їхніх потреб сприяє формуванню стратегій раціонального використання ресурсів, зокрема повторного залучення критичних матеріалів із відходів [11].

Водночас у працях зарубіжних вчених обґрунтовано принципи 4R (скорочення, повторне використання, перероблення та відновлення), «зеленого» споживання та збереження екосистем, які формують теоретичне підґрунтя для впровадження циркулярної економіки у сфері вилучення РЗЕ [12].

У світовій науці також можна знайти багато наукових праць у цій сфері. Концептуальні засади сталого вилучення РЗЕ з техногенних відвалів і промислових відходів розглянуті Ш.-Ч. Ліном та Ю.-Дж. Лі, які розглядають їх крізь призму підходів до забезпечення сталого розвитку на рівні територіальних громад [13]. В дослідженні Р. Хайду-Рахкама та П. Кіннуніна наголошується на багатовимірному характері сталого розвитку, що охоплює екологічну, економічну, соціальну та інституційну складові, що можуть бути формалізовані через систему індикаторів сталого розвитку громади. Такий підхід є релевантним для проєктів щодо валоризації хвостів, оскільки передбачає не лише технологічну ефективність, а й узгодження з екологічною місткістю території, принципами ресурсоефективності та соціальної прийнятності [14].

Системне бачення проблеми вилучення РЗЕ з техногенних відходів висвітлено в публікаціях [15, 16]. Зокрема в них подано критичний огляд методів вилучення РЗЕ з різних типів техногенних відходів та окреслено проблеми «балансу» при вилученні РЗЕ з відходів та руд, з акцентом на технологічні та економічні виклики переробки. Зарубіжні дослідження показують, що хвости збагачення титано-цирконієвих розсипів можуть бути перспективним джерелом РЗЕ. Сфера дослідження представлена ідентифікацією методів їх вилучення (кислотного вилуговування; біотехнологій та інтенсифікованої екстракції). Систематичний огляд можливостей вилучення РЗЕ з хвостів і шлаків, включно з титано-цирконієвими представлено Т. Янгом [17]. Автором розглянуто кислотне вилуговування, іонний обмін та комбіновані методи. Огляд технологій вилучення РЗЕ з хвостів різних гірничих виробництв, включно з титано-цирконієвими розсипами представлено Л. Ечевері-Варгасом та іншими [18]. Авторами показано потенціал кислотного вилуговування та селективної екстракції. Можливість вилучення РЗЕ з хвостів за допомогою електрокінетично підсиленої фітоекстракції досліджено у праці [19]. Науково обґрунтовано, що цей метод є перспективним для екологічно небезпечних відвалів, включно з титано-цирконієвими.



До того ж, наведена проблематика знайшла своє втілення і у стратегічних документах провідних міжнародних організацій. У методичних рекомендаціях ПРООН «Інтегрований підхід до відновлення та розвитку громади» (2024) обґрунтовано необхідність застосування комплексного, міжсекторального підходу до планування розвитку територіальних громад, який передбачає поєднання економічних, екологічних, соціальних та інституційних складових у єдиній системі стратегічного управління. Особливий акцент зроблено на важливості попередньої оцінки потреб громади, визначенні пріоритетів та ефективному розподілі ресурсів як базових умов відновлення та довгострокового розвитку [20].

У доповіді ООН “Harnessing the Potential of Critical Minerals for Sustainable Development” (2025) підкреслюється, що критично важливі мінерали, зокрема РЗЕ, є основою глобального енергетичного переходу та розвитку «зеленої» економіки, оскільки їх попит стрімко зростає разом із поширенням відновлюваних джерел енергії та низьковуглецевих технологій. Водночас використання цього потенціалу супроводжується значними ризиками, включаючи екологічні наслідки (забруднення водних ресурсів, деградація ґрунтів), соціальні виклики та залежність від нестабільних сировинних ринків. Особливу увагу приділено необхідності переходу до більш сталих моделей управління ресурсами, зокрема розвитку переробки та повторного використання мінеральної сировини як складової циркулярної економіки. У цьому контексті вилучення РЗЕ із техногенних відходів, зокрема хвостів збагачення титано-цирконієвих руд, відповідає сучасним глобальним підходам до диверсифікації джерел постачання критичних ресурсів, зниження екологічного навантаження та створення доданої вартості на локальному рівні, що відкриває можливості для посилення економічної спроможності громад за умови належного інституційного регулювання та дотримання принципів сталого розвитку [21].

У білій книзі «Стратегічна дорожня карта розкриття критичного сировинного потенціалу України» підкреслюється, що Україна володіє значним потенціалом критичних мінеральних ресурсів, включаючи титан і супутні елементи, однак його реалізація потребує переходу від сировинної моделі до створення повноцінних ланцюгів доданої вартості - від видобутку до переробки та повторного використання матеріалів. У цьому контексті вилучення рідкісноземельних елементів із техногенних відходів, зокрема хвостів збагачення титано-цирконієвих руд, відповідає стратегічним пріоритетам розвитку сектору критичних матеріалів, оскільки дозволяє поєднати ресурсну ефективність, екологічну реабілітацію територій та створення локальної доданої вартості, що відкриває додаткові можливості для економічного розвитку громад і підвищення їхньої самодостатності [22].

К. Зглінський та інші науковці досліджують хвостосховища як перспективне джерело важких РЗЕ та урану, що підсилює концепцію використання техногенних відходів для задоволення потреб сучасних технологій



та кліматичних стратегій ЄС, зокрема Зелену Угоду через диверсифікацію ланцюгів постачання критичних матеріалів. Виявлено, що хвости містять значні концентрації мінералів, таких як ксенотим і монацит, які є носіями важких РЗЕ і можуть бути технічно відокремлені та використані як вторинний ресурс. Це, в свою чергу зменшує залежність від первинного видобутку і зменшує екологічний вплив традиційних операцій з видобування [23].

П. Дагвар та С. Ікбал, Д. Дутта оцінюють потенціал відновлення промислових відходів як вторинного джерела РЗЕ, з акцентом на стійких технологіях видобутку та принципах циркулярної економік і визначають екотоксикологічні ризики РЗЕ, наголошуючи на необхідності моніторингу та дотримання стандартів безпеки праці. Завдяки інтеграції стратегій сталого відновлення обґрунтовано екологічні аспекти вилучення РЗЕ, одночасно зменшуючи вплив на навколишнє середовище та сприяючи циркулярній економіці [24].

Таким чином, вилучення РЗЕ з техногенних відходів - зокрема, титанових відвалів - може стати дієвим шляхом реалізації внутрішніх ресурсів громад, сприяючи зміцненню економічної стійкості на місцевому рівні, оптимізації використання накопичених матеріалів їх інтеграції в циркулярні моделі управління ресурсами, що особливо актуально в умовах глобальних стратегій сталого розвитку та переходу до низьковуглецевої економіки ЄС.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У країнах ЄС активно впроваджуються програми повторної переробки критичних сировинних матеріалів, що включають РЗЕ, в межах концепції циркулярної економіки. Дослідження доводять, що техногенні відвали і відходи можуть містити суттєві концентрації РЗЕ, іноді навіть вищі, ніж у природних рудах, що робить їх потенційно привабливими об'єктами для повторної розробки. Водночас технології вилучення РЗЕ з таких об'єктів потребують наукового супроводу з розробкою ТЕО та адаптації до конкретних типів відходів з визначенням впливу на соціально-економічний розвиток територіальних громад.

В Україні наукові розробки у цій сфері є малодослідженими. Наразі існує низка наукових праць, що розглядають хімічний склад техногенних відходів і відвалів, однак практична реалізація проєктів з переробки відходів з метою отримання РЗЕ наразі є обмеженою. Водночас техногенні відвали різних регіонів України можуть бути стратегічним резервом для забезпечення потреб у РЗЕ для різних галузей промисловості. З іншого боку впровадження таких технологій безпосередньо сприяє сталому розвитку територіальних громад. Вилучення РЗЕ з відходів не лише зменшує антропогенне навантаження на довкілля, а й створює нові економічні можливості для місцевого самоврядування, зокрема через залучення інвестицій, створення робочих місць та розвиток інфраструктури переробки.

Таким чином, наукова проблема обґрунтування можливості вилучення РЗЕ з техногенних відвалів і відходів набуває міждисциплінарного характеру,



охоплюючи сфери економіки природокористування, геохімії, мінералогії, технологій збагачення, екологічної безпеки та стратегічного планування розвитку територіальних громад. Подальші дослідження у цьому напрямі мають сприяти створенню ефективних моделей переробки техногенних об'єктів із урахуванням соціальних та екологічних критеріїв сталого розвитку.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою дослідження є обґрунтування концептуальних засад для впровадження технологій вилучення РЗЕ з техногенних відвалів і відходів, що залишились після діяльності добувної, металургійної та іншої промислової сфери для забезпечення сталого розвитку територіальних громад у відповідь на сучасні виклики та їх інтеграцію у місцеві політики.

Методи та методологія. Дослідження здійснювалося у межах теорії сталого розвитку, циркулярної економіки та ресурсозбереження, що дозволило оцінити потенціал вилучення РЗЕ із техногенних відходів для економіко-екологічного розвитку територіальних громад. Використано описовий статистичний аналіз (оцінка обсягів накопичених відвалів, визначення їх структури та екологічних ризиків); аналітичний метод (систематизація даних національних і міжнародних досліджень, виявлення чинників ефективності переробки); порівняльний метод (зіставлення українських практик із зарубіжними для визначення оптимальних технологій вилучення РЗЕ); системний підхід (інтеграція технологічних, економічних, соціальних та управлінських факторів у комплексну оцінку сталого розвитку громад). Джерельна база охопила офіційну статистику (Державна служба геології та надр України, матеріали НАН України), стратегічні документи ООН, ЄС та України. Додатково використано матеріали міжнародних публікацій, що дозволяють простежити ефективність різних технологій вилучення РЗЕ.

Виклад основного матеріалу дослідження. Мінеральні ресурси є основою глобального економічного розвитку та суспільного прогресу. Із прискоренням індустріалізації та технологічних інновацій попит на сировину неухильно зростає протягом останніх десятиліть. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства (IEA), світовий попит на критично важливі мінерали, включно з РЗЕ, може зрости до 2030 року втричі у зв'язку з поширенням відновлюваних джерел енергії та технологій чистої енергетики, що вимагають значної кількості цих ресурсів для електромобілів, сонячних панелей та вітрових турбін. При цьому Міжнародне енергетичне агентство прогнозує, що загальний попит на критичні мінерали в сценарії Net Zero Emissions до 2030 року може перевищити 30 млн тонн, порівняно зі значно нижчими рівнями сьогоденних показників [25].

Ці зростаючі потреби стимулюють безперервне нарощення видобутку та переробки гірничої сировини, що призводить до утворення великих обсягів техногенних відходів, включаючи хвости збагачення та флотаційні шлами, які вже становлять значну частину накопичених шахтних відвалів і представляють потенційне вторинне джерело цих стратегічних матеріалів. Часто техногенні



відходи гірничодобувної галузі містять економічно важливі речовини, деякі з яких належать до сучасних критичних мінералів, а також інші цінні вторинні елементи. Міжнародний досвід показує, що вилучення РЗЕ з титано-цирконієвих розсипів здійснюється як побічний процес при переробці монациту, ільменіту, апатиту, рутилу та циркону. Найбільш поширені технології - гравітаційне та магнітне збагачення з подальшим кислотним вилуговуванням, іонний обмін та комплексна гідрометалургія.

Мінерально-сировинною базою РЗЕ в хвостах збагачення титано-цирконієвих руд є кори вивітрювання кристалічних порід фундаменту, континентальні розсипи апту-нижнього альбу, середнього еоцену, четвертинної системи, узбережно-морські розсипи верхньої крейди і міоцену. Титано-цирконієві родовища в Україні розробляють переважно державна «Об'єднана гірничо-хімічна компанія» (ОГХК), що включає Вільногірський ГМК та Іршанський ГЗК, а також приватні компанії: ТОВ «Валки-Ільменіт» (група Group DF), ТОВ ВКФ «Велта» та Демурінський ГЗК. Збагачення титанових і титано-цирконієвих руд в Україні здійснюють Іршанський ГЗК, Межиріченський ГЗК, Бирзулівський ГЗК, Демурінський ГЗК та Вільногірський ГМК. Кожен із комбінатів має власну сировинну базу, що визначає його спеціалізацію: Житомирщина - ільменітові розсипи (Межирічне, Іршанське), Кіровоградщина - комплексне Лікарівське родовище (ільменіт-циркон), Дніпропетровщина - Малишівське і Вовчанське родовища (ільменіт-рутил-циркон). Це формує основу титанової промисловості України та визначає перспективи розвитку сектору критичних матеріалів, зокрема й у хвостах збагачення [26].

Техногенні об'єкти, сформовані внаслідок діяльності гірничодобувної, металургійної та хімічної промисловості, характеризуються наявністю залишкових концентрацій РЗЕ, які за окремими параметрами можуть бути співставними або перевищувати їх вміст у природних родовищах. Оцінювання потенціалу таких об'єктів доцільно здійснювати на основі комплексного підходу, що поєднує геохімічний аналіз складу та концентрацій РЗЕ, просторову локалізацію техногенних відвалів у межах територіальних громад, ресурсно-економічну оцінку обсягів доступної сировини та екологічний аудит рівня антропогенного впливу. Зазначений підхід дозволяє формувати реєстр техногенних родовищ як складову ресурсної бази регіонального розвитку.

З огляду розробки титано-цирконієвих родовищ в Україні та їх мінерального складу, головними концентраторами РЗЕ є такі мінерали: циркон, монацит, апатит. Монацит - основний промисловий концентрат РЗЕ багатий на Ce, La, Nd, Pr. може вміщувати до 70 % оксидів РЗЕ. Апатит містить до 3–7% РЗЕ, а циркон - до 2 %. Вміст РЗЕ в мінералах відрізняється в різних родовищах. Так, у рудних пісках Малишевського родовища вміст в ільменіті Nb₂O₅ - 0,1 %, Ta₂O₅ - 0,02 %, в рутилі вміст Nb₂O₅ - 0,5 %; в цирконі вміст HfO₂ - 1,19 %. В монациті і ксенотимі Тарасівського і Зеленоярського родовищ вміст РЗЕ досягає 63,2 %, ThO₂ - 3,32 %; в рутилі Тарасівського родовища вміст РЗЕ - 0,13 %.



Значно ширший спектр РЗЕ в монациті, зокрема Тарасівського родовища: La₂O₃ -14,7%, Pr₂O₃ - 2,8 %, Nd₂O₃ - 12,3% Sm₂O₃ - 1,8%, Gd₂O₃ - 1,9%, Th₂O₃ - 8,2%, Dy₂O₃ - 0,9 %, Er₂O₃ - 0,2%, Tm₂O₃ - 0,2%, Y₂O₃ - 2,2%. Вміст рідкісноземельних елементів у наведеному монациті свідчить про високу концентрацію легких РЗЕ (La, Ce, Pr, Nd), що є типовим для більшості монацитових концентратів. La₂O₃ – 14,7% та Nd₂O₃ – 12,3%: разом із Pr₂O₃ (2,8%) формують основу легких РЗЕ, які мають значний попит у виробництві постійних магнітів, лазерних матеріалів та каталізаторів. Sm₂O₃ (1,8%) та Gd₂O₃ (1,9%): середні РЗЕ, важливі для ядерної енергетики та магнітних матеріалів. Dy₂O₃ (0,9%), Er₂O₃ (0,2%), Tm₂O₃ (0,2%), Y₂O₃ (2,2%): важкі РЗЕ, хоча їхній вміст невеликий, є стратегічно цінними для високотехнологічних застосувань (енергозберігаючі магніти, лазери, оптичні матеріали) [27].

Накопичення техногенних відходів створює екологічні, соціальні та економічні загрози: деградацію ґрунтів, забруднення водних ресурсів, погіршення якості життя населення. Водночас ці відходи містять РЗЕ, що відкриває можливості для їх повторного залучення у господарський обіг. Проблема полягає у відсутності ефективних технологій вилучення та належних інституційних механізмів управління ресурсами. Аналіз наявних методів вилучення рідкісноземельних елементів з техногенних відходів титано-цирконієвих руд дозволив з'ясувати їх недоліки і переваги (таблиця 1).

Таблиця 1
Порівняння методів вилучення рідкісноземельних елементів (РЗЕ) з техногенних відходів титано-цирконієвих руд із зазначенням їхніх переваг та недоліків

Метод вилучення	Переваги	Недоліки
Флотація та гравітаційне збагачення	- відносна простота технології; - низькі витрати енергії; - можливість попереднього концентрування.	- обмежена ефективність для тонкодисперсних РЗЕ - не забезпечує високої чистоти продукту
Гідрометалургія (кислотне/лужне вилуговування)	- високий ступінь вилучення РЗЕ; - можливість комплексної переробки; - технологія добре відпрацьована	- значні витрати реагентів - екологічні ризики (кислотні стоки) - потреба у складній очистці розчинів
Сорбція та іонний обмін	- висока селективність до РЗЕ - можливість повторного використання сорбентів - отримання концентрованих розчинів.	- висока вартість сорбентів - обмежена продуктивність - необхідність регенерації сорбентів
Пірометалургія (випал, плавлення)	- можливість вилучення РЗЕ у вигляді оксидів - зниження об'єму відходів - сумісність із іншими металургійними процесами	- високі енергетичні витрати - втрата частини РЗЕ при високих температурах - екологічні ризики (викиди газів)
Біотехнологічні методи	- екологічна безпечність	- повільність процесу



Метод вилучення	Переваги	Недоліки
	- низькі витрати енергії - можливість роботи з бідними відходами	- потреба у спеціальних мікроорганізмах - складність масштабування
Інтегровані схеми (комбінування методів)	- максимізація вилучення РЗЕ - гнучкість технології - можливість адаптації до різних типів відходів	- складність технологічних ланцюгів - висока капіталомісткість - потреба у комплексному управлінні процесами

Джерело: складено на основі аналізу зарубіжних публікацій стосовно технологій вилучення РЗЕ з мінеральної речовини.

Вилучення РЗЕ із техногенних відходів слід розглядати крізь призму циркулярної економіки та принципів сталого розвитку. Аналіз технологічних підходів показує, що гідрометалургія має високий ступінь вилучення, але значні екологічні ризики; сорбція та іонний обмін характеризуються високою селективністю, проте обмеженою продуктивністю; біотехнології – це екологічна безпечність, але низька швидкість процесів; інтегровані схеми - поєднання методів для максимізації ефективності. Методологія включає: аналіз мінерального складу хвостів; вибір оптимальних технологій вилучення (гідрометалургія, біотехнології, сорбція); оцінку екологічних ризиків; розробку індикаторів сталого розвитку громад.

Впровадження технологій вилучення РЗЕ з техногенних відходів має синергетичний економічний та екологічний ефект (рис.1).

Запропонована багаторівнева концептуальна модель вилучення РЗЕ з техногенних відходів інтегрує технологічні, економічні та управлінські компоненти на засадах циркулярної економіки, передбачаючи повторне залучення ресурсів у виробничий цикл. У межах даної моделі виокремлено такі організаційно-економічні форми реалізації: локальну (децентралізовану), орієнтовану на переробку відходів у межах територіальних громад із залученням МСП; індустріально-кластерну, що базується на концентрації виробничих і наукових потужностей; модель публічно-приватного партнерства, яка забезпечує поєднання державного стимулювання та приватних інвестицій; а також інтегровану європейську модель, спрямовану на гармонізацію стандартів і включення до міжнародних ланцюгів створення доданої вартості. Вибір моделі визначається типом відходів, рівнем технологічного розвитку та інституційною спроможністю регіону, що впливає на зниження витрат на геологорозвідку та первинний видобуток, формуванні нових сегментів ринку вторинної сировини, залученні інвестицій та розвитку інноваційного підприємництва, а також у підвищенні ресурсної незалежності. Водночас екологічний ефект полягає у скороченні площ деградованих територій, зниженні рівня забруднення компонентів довкілля, зменшенні обсягів накопичених відходів та впровадженні принципів «зеленої» трансформації.

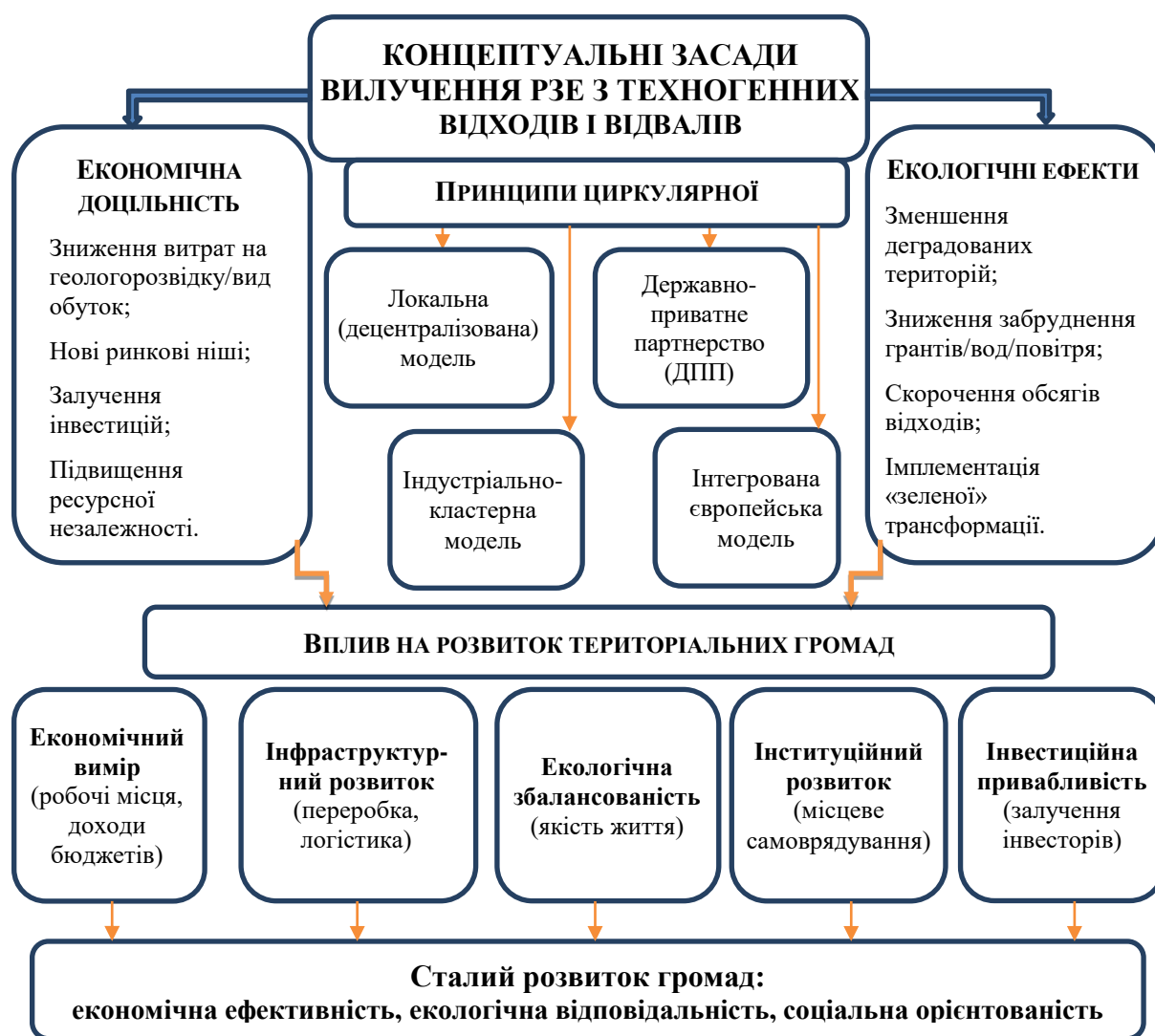


Рис. 1. Схема впровадження технологій вилучення РЗЕ для сталого розвитку територіальних громад

Джерело: розробка авторів

Реалізація стратегії соціально-економічного розвитку територіальної громади на основі вилучення вторинної сировини передбачає поетапний перехід від сприйняття відходів як екологічної проблеми до формування економічної цінності з техногенних відвалів і відходів гірничо-збагачувальних та гірничо-металургійних комбінатів, розташованих на їхніх територіях.

Реалізація програм вилучення РЗЕ з техногенних відходів, зокрема хвостів збагачення титано-цирконієвих руд, потребує наукового супроводу, який в Україні забезпечується установами Національної академії наук України, галузевими науково-дослідними інститутами та провідними закладами вищої освіти, що мають сформовані наукові школи у сферах геології, гірництва, хімічних технологій, екології та економіки природокористування. Науковий



супровід включає достовірну діагностику ресурсного потенціалу, оптимізацію технологій, управління ризиками, бізнес-моделей та розробку ТЕО з врахуванням принципів ESG (Environmental, Social, Governance). Цей підхід передбачає взаємодію екологічної, соціальної та управлінської складової.

Екологічна складова передбачає мінімізацію негативного впливу на довкілля шляхом впровадження безпечних технологій вилучення РЗЕ, очищення відходів, рекультивациі порушених територій та зниження рівня забруднення. Соціальна складова орієнтована на підвищення якості життя населення територіальних громад через створення нових робочих місць, розвиток локальної інфраструктури, забезпечення безпечних умов праці та залучення громадськості до процесів прийняття рішень.

Управлінська складова включає формування прозорих інституційних механізмів, підзвітність органів влади та бізнесу, дотримання антикорупційних стандартів і ефективне управління ресурсами на засадах сталого розвитку. Інтеграція ESG-принципів у проекти переробки техногенних відходів дозволяє підвищити їх інвестиційну привабливість, забезпечити доступ до міжнародного фінансування, знизити ризики реалізації та узгодити економічні інтереси з екологічними й соціальними пріоритетами.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Узагальнюючи результати дослідження, встановлено, що зростаючий глобальний попит на РЗЕ обумовлює необхідність впровадження інтегрованих підходів до забезпечення їх видобутку та ефективного використання, які поєднують екологічну безпеку, економічну ефективність і соціальну прийнятність. Розглянуто можливості використання техногенних відвалів і відходів, зокрема хвостів збагачення титано-цирконієвих руд, як перспективного джерела критичних матеріалів як стратегічного напрямку переходу до циркулярної моделі економіки та підвищення ресурсної самодостатності територіальних громад. Доведено, що залучення таких вторинних ресурсів до господарського обігу сприяє зниженню екологічного навантаження та інвестиційних витрат порівняно з первинним видобутком, удосконаленні систем управління ресурсами та забезпеченні інституційної та інвестиційної підтримки.

Проведений аналіз засвідчує, що вилучення рідкісноземельних елементів із техногенних відходів, зокрема хвостів збагачення титано-цирконієвих руд, має подвійне значення: воно одночасно вирішує проблему накопичення екологічно небезпечних матеріалів та формує ресурсну базу для територіальних громад. Такий підхід відповідає сучасним глобальним тенденціям циркулярної економіки та сприяє досягненню ЦСР, зокрема у сферах відповідального споживання, інноваційного виробництва та екологічної безпеки.

Загалом запропонований підхід сприяє формуванню зеленої моделі регіонального розвитку, що інтегрує технологічні, економічні та ESG аспекти у єдину систему, з можливістю використання техногенних відходів як вторинного джерела критичних матеріалів, що відкриває перспективи для створення



локальних виробничих кластерів, підвищення зайнятості та формування доданої вартості на місцевому рівні.

Водночас реалізація цієї моделі потребує впровадження екологічно безпечних технологій вилучення РЗЕ; формування інституційних механізмів управління ресурсами на рівні громад; підвищення екологічної свідомості населення та залучення стейкхолдерів до процесів прийняття рішень; наукового супроводу та інтеграції наукових досліджень у систему стратегічного планування розвитку територій.

Фінансування. Наукова стаття підготовлена в рамках виконання науково-дослідної роботи «Технології вилучення рідкісноземельних елементів з техногенних відвалів та відходів виробництва для сталого розвитку територіальних громад» (реєстраційний номер 2023.01/0933) відповідно до Договору про надання грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу «Передова наука в Україні 2026–2028».

Конфлікт інтересів. Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

Декларація про використання ШІ. Під час підготовки рукопису автори частково використовували інструменти штучного інтелекту ChatGPT для редагування тексту. Усі результати, висновки та інтерпретації є виключно авторським внеском.

Список використаних джерел

1. Курило М., Кошарна С. Стратегічне значення рідкісноземельних елементів для сучасних технологій та перспективи вітчизняних родовищ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2024. № 1 (104). С. 63–69. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.08>.
2. Сукач В. В., Ісаков Л. В., Хомич Ю. Є. Мінералого-геохімічна характеристика рідкісноземельного зруденіння у Середньому Придніпров'ї (на прикладі Котлярівського рудопроаяву). *Мінеральні ресурси України.* 2024. № 4. С. 8–15. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2024.4.8-15>.
3. Сукач В. В., Василенко А. П., Гейченко М. В. Рідкісноземельні метали України: стратегічний ресурс для розвитку сучасної глобальної економіки. *Мінеральні ресурси України.* 2025. № 4. С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2025.4.3-8>.
4. Семчук Ж., Нитребич А., Андрюшко Д., Маркевич О., Тимик А., Купчак В., Перцевий Р. Моделі сталого розвитку підприємств у контексті глобальних екологічних викликів. *Академічні візії.* 2024. № 32. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11632366>.
5. World Economic Situation and Prospects 2025: Harnessing the Potential of Critical Minerals for Sustainable Development. United Nations, 2025. URL: https://desapublications.un.org/sites/default/files/publications/2025-01/WESP%202025_Harnessing%20the%20Potential%20of%20Critical%20Minerals%20for%20Sustainable%20Development_WEB.pdf (дата звернення: 20.02.2026)
6. Які корисні копалини України цікавлять США та ЄС. *The Page.* URL: <https://thepage.ua/ua/economy/yaki-korisni-kopalini-ukrayini-cikavi-ssha-ta-yes> (дата звернення: 20.02.2026)
7. Цілі сталого розвитку в Україні. *UNDP Ukraine.* URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku> (дата звернення: 20.02.2026)
8. Потенціал розвитку територій: методологічні засади формування і нарощення : монографія / О. Ю. Бобровська та ін. ; за заг. ред. О. Ю. Бобровської. Дніпро : ДРІДУ НАДУ, 2017. 362 с.



9. Стале ендегенне зростання регіонів України в умовах децентралізації : монографія / за ред. І. З. Сторонянської. Львів : ДУ «Інститут регіональних досліджень ім. М. І. Долишнього НАН України», 2019. 501 с.
10. Бобровська О. Ю. Потенціал місцевого самоврядування в забезпеченні сталого розвитку регіону. *Аспекти публічного управління*. 2016. Т. 4, № 4–5. С. 56–69.
11. Уляненко Д. В. Розвиток технологій рециклінгу в рамках трансформації промисловості до моделі циркулярної економіки. *Економіка і організація управління*. 2026. № 4(60). С. 242–257. DOI: <https://doi.org/10.31558/2307-2318.2025.4.23>.
12. Варфоломєєв М. О. Парадигма циркулярної економіки в умовах України. *Бізнес Інформ*. 2021. № 2. С. 13–20. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2021_2_3 (дата звернення: 23.02.2026)
13. Lin S.-C., Lee Y.-J. The Sustainable Community Strategies: To Evaluate the Sustainable Development of Community. URL: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB8251.pdf> (дата звернення: 23.02.2026)
14. Hajdu-Rahkama R., Kinnunen P. Tailings valorisation: Opportunities to secure rare earth supply and make mining environmentally more sustainable. *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 520. Article 146147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146147>.
15. Binnemans K., Jones P. T., Blanpain B., Van Gerven T., Yang Y., Walton A., Buchert M. Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 51. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.
16. Binnemans K., Jones P. T. Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with the Surplus of Cerium and the Shortage of Dysprosium. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015. Vol. 1, no. 1. P. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-014-0005-1>.
17. Yang T. *Recovery of metals from rare-earth-containing tailings and slags: alleviating material constraints in renewable energy systems* : master's thesis. LUT University, 2025. URL: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2025061871739>
18. Echeverry-Vargas L., Ocampo-Carmona L. M. Recovery of Rare Earth Elements from Mining Tailings: A Case Study for Generating Wealth from Waste. *Minerals*. 2022. Vol. 12, no. 8. Article 948. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12080948>.
19. Medina-Díaz H. L., López-Bellido F. J., Alonso-Azcárate J., Fernández-Morales F. J., Rodríguez L. Can rare earth elements be recovered from abandoned mine tailings by means of electrokinetic-assisted phytoextraction? *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31. P. 26747–26759. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32759-3>.
20. Інтегрований підхід до відновлення та розвитку громади: методичні рекомендації для органів місцевого самоврядування. URL: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-12/metodyka_samoosinkyky.pdf (дата звернення: 23.02.2026)
21. Harnessing the Potential of Critical Minerals for Sustainable Development. United Nations, 2025. URL: https://desapublications.un.org/sites/default/files/publications/2025-01/WESP%202025_Harnessing%20the%20Potential%20of%20Critical%20Minerals%20for%20Sustainable%20Development_WEB.pdf (дата звернення: 23.02.2026)
22. Strategic roadmap for unlocking Ukraine's critical raw materials potential. 2025. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2025/07/20250711_CRM-whitepaper_final_SCREEN.pdf (дата звернення: 26.02.2026)
23. Zglinicki K., Małek R., Szamałek K., Wołkiewicz S. Mining Waste as a Potential Additional Source of HREE and U for the European Green Deal: A Case Study of Bangka Island (Indonesia). *Minerals*. 2022. Vol. 12, no. 1. Article 44. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12010044>.



24. Dagwar P. P., Iqbal S. S., Dutta D. Sustainable recovery of rare Earth elements from industrial waste: A path to circular economy and environmental health. *Waste Management Bulletin*. 2025. Vol. 3. P. 373–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.02.004>.
25. Global Critical Minerals Outlook 2024: Executive summary. IEA. 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024/executive-summary> (дата звернення: 26.02.2026)
26. Reserves of critical and strategic minerals in Ukraine verified according to UNFC. *Nadra.info*. 2025. URL: <https://nadra.info/2025/09/reserves-of-critical-and-strategic-minerals-in-ukraine-verified-according-to-unfc/> (дата звернення: 26.02.2026)
27. Трач Ю. Відходи видобутку нерудних корисних копалин: сучасний стан та наявні способи зменшення їх накопичення. *Управління розвитком складних систем*. 2022. № 51. С. 141–149. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.141-149>

References

1. Kurylo, M., & Kosharna, S. (2024). Strategic importance of rare earth elements for modern technologies and prospects of domestic deposits. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, (1(104))*, 63–69. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.08> [in Ukrainian].
2. Sukach, V. V., Isakov, L. V., & Khomych, Yu. Ye. (2024). Mineralogical and geochemical characteristics of rare earth mineralization in the Middle Dnieper region: A case study of the Kotliarivske ore occurrence. *Mineralni Resursy Ukrainy, (4)*, 8–15. <https://doi.org/10.31996/mru.2024.4.8-15> [in Ukrainian].
3. Sukach, V. V., Vasylenko, A. P., & Heichenko, M. V. (2025). Rare earth metals of Ukraine: A strategic resource for the development of the modern global economy. *Mineralni Resursy Ukrainy, (4)*, 3–8. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.4.3-8> [in Ukrainian].
4. Semchuk, Zh., Nytrebych, A., Andriushko, D., Markevych, O., Tymyk, A., Kupchak, V., & Pertseyvi, R. (2024). Models of sustainable development of enterprises in the context of global environmental challenges. *Akademichni vizii, (32)*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11632366> [in Ukrainian].
5. United Nations. (2025). World economic situation and prospects 2025: Harnessing the potential of critical minerals for sustainable development. https://desapublications.un.org/sites/default/files/publications/2025-01/WESP%202025_Harnessing%20the%20Potential%20of%20Critical%20Minerals%20for%20Sustainable%20Development_WEB.pdf
6. What minerals of Ukraine are of interest to the USA and the EU. (n.d.). The Page. <https://thepage.ua/ua/economy/yaki-korisni-kopalini-ukrayini-cikavi-ssha-ta-yes> [in Ukrainian].
7. UNDP Ukraine. (n.d.). Sustainable Development Goals in Ukraine. <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku> [in Ukrainian].
8. Bobrovska, O. Yu. (Ed.). (2017). *Potential of territorial development: Methodological foundations of formation and growth*. DRIDU NADU [in Ukrainian].
9. Storonianska, I. Z. (Ed.). (2019). *Sustainable endogenous growth of Ukrainian regions under decentralization*. DU “Instytut rehionalnykh doslidzhen im. M. I. Dolishnoho NAN Ukrainy” [in Ukrainian].
10. Bobrovska, O. Yu. (2016). The potential of local self-government in ensuring sustainable regional development. *Aspekty publichnoho upravlinnia, 4(4–5)*, 56–69 [in Ukrainian].
11. Ulianenko, D. V. (2026). Development of recycling technologies within the transformation of industry to the circular economy model. *Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia, 4(60)*, 242–257. <https://doi.org/10.31558/2307-2318.2025.4.23> [in Ukrainian].
12. Varfolomieiev, M. O. (2021). The paradigm of circular economy in the conditions of Ukraine. *Biznes Inform, (2)*, 13–20. http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2021_2_3 [in Ukrainian].



13. Lin, S.-C., & Lee, Y.-J. (n.d.). The sustainable community strategies: To evaluate the sustainable development of community. <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB8251.pdf>
14. Hajdu-Rahkama, R., & Kinnunen, P. (2025). Tailings valorisation: Opportunities to secure rare earth supply and make mining environmentally more sustainable. *Journal of Cleaner Production*, (520), 146147. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146147>
15. Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, (51), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>
16. Binnemans, K., & Jones, P. T. (2015). Rare earths and the balance problem: How to deal with the surplus of cerium and the shortage of dysprosium. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 1(1), 29–38. <https://doi.org/10.1007/s40831-014-0005-1>
17. Yang, T. (2025). *Recovery of metals from rare-earth-containing tailings and slags: Alleviating material constraints in renewable energy systems* [Master's thesis, LUT University]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2025061871739>
18. Echeverry-Vargas, L., & Ocampo-Carmona, L. M. (2022). Recovery of rare earth elements from mining tailings: A case study for generating wealth from waste. *Minerals*, 12(8), 948. <https://doi.org/10.3390/min12080948>
19. Medina-Díaz, H. L., López-Bellido, F. J., Alonso-Azcárate, J., Fernández-Morales, F. J., & Rodríguez, L. (2024). Can rare earth elements be recovered from abandoned mine tailings by means of electrokinetic-assisted phytoextraction? *Environmental Science and Pollution Research*, (31), 26747–26759. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32759-3>
20. UNDP. (2024). Integrated approach to community recovery and development: Methodological recommendations for local self-government bodies. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-12/metodyka_samoosinky.pdf [in Ukrainian].
21. United Nations. (2025). Harnessing the Potential of Critical Minerals for Sustainable Development. https://desapublications.un.org/sites/default/files/publications/2025-01/WESP%202025_Harnessing%20the%20Potential%20of%20Critical%20Minerals%20for%20Sustainable%20Development_WEB.pdf
22. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2025). Strategic roadmap for unlocking Ukraine's critical raw materials potential. https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2025/07/20250711_CRM-whitepaper_final_SCREEN.pdf
23. Zglinicki, K., Małek, R., Szamałek, K., & Wołkowicz, S. (2022). Mining waste as a potential additional source of HREE and U for the European Green Deal: A case study of Bangka Island (Indonesia). *Minerals*, 12(1), 44. <https://doi.org/10.3390/min12010044>
24. Dagwar, P. P., Iqbal, S. S., & Dutta, D. (2025). Sustainable recovery of rare Earth elements from industrial waste: A path to circular economy and environmental health. *Waste Management Bulletin*, (3), 373–390. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.02.004>
25. IEA. (2024). Global critical minerals outlook 2024: Executive summary. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024/executive-summary>
26. Nadra.info. (2025). Reserves of critical and strategic minerals in Ukraine verified according to UNFC. <https://nadra.info/2025/09/reserves-of-critical-and-strategic-minerals-in-ukraine-verified-according-to-unfc/> [in Ukrainian].
27. Trach, Yu. (2022). Waste of non-metallic mineral extraction: Current state and existing ways to reduce its accumulation. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, (51), 141–149. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.141-149> [in Ukrainian].

Отримано:	30.03.2026	Beérkezett:	2026.03.30	Received:	30.03.2026
Прийнято до друку:	02.05.2026	Elfogadva:	2026.05.02	Accepted:	02.05.2026
Опубліковано:	29.05.2026	Megjelent:	2026.05.29	Published:	29.05.2026