УДК 553.04

Техногенні об’єкти як вторинне джерело критичної сировини: особливості геолого-економічної оцінки

Курило Марія Михайлівна,.[1], *д.геол.н., доцент, marikurylo@meta.ua ;*
Котенко Олександр Іванович[1], *аспірант, alexktenko@gmail.com*
1 – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ННІ Інститут геології, Київ, Україна,

Зростання попиту на критичну сировину, необхідність диверсифікації її постачання та розвиток циркулярної економіки підвищують значення техногенних об’єктів як потенційного джерела вторинних мінеральних ресурсів. До таких об’єктів належать хвостосховища, відвали розкривних і вміщуючих порід, шламонакопичувачі, металургійні шлаки, золошлакові відвали, відходи переробки та інші накопичення, сформовані внаслідок господарської діяльності. В публікації показано, що сам факт наявності відходів або підвищених концентрацій цінних компонентів не є достатньою підставою для визнання техногенного накопичення ресурсним об’єктом. Геолого-економічна оцінка повинна поєднувати визначення кількості та якості матеріалу, просторової мінливості, мінеральних форм критичних компонентів, їх технологічної вилучуваності, можливості одержання товарного продукту, екологічних ефектів та економічної життєздатності проєкту. Запропоновано розглядати оцінювання техногенних об’єктів як інтегровану систему «ресурс – технологія – продукт – екологічний ефект – ринок». Особливого значення набуває застосування Рамкової класифікації ООН - United Nations Framework Classification for Resources/ UNFC до антропогенних ресурсів, що дозволяє одночасно враховувати ступінь достовірності вивчення, технічну готовність і соціально-економічну життєздатність проєкту.

Ключові слова: техногенні родовища, критична сировина, вторинна сировина, антропогенні ресурси, геолого-економічна оцінка, UNFC

Technogenic objects as a secondary source of critical raw materials: specific features of geological and economic assessment

***Mariia Kurylo[1]*, D.Sc. in Geology, Associate Professor, *marikurylo@meta.ua*;**
Oleksandr Kotenko[1]*, PhD Student, *alexktenko@gmail.com
[1] Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology, Kyiv, Ukraine

The growing demand for critical raw materials, the need to diversify supply chains, and the transition toward a circular economy are increasing the importance of technogenic objects as potential sources of secondary mineral resources. Such objects include tailings storage facilities, waste-rock dumps, sludge ponds, metallurgical slags, coal combustion residues, processing wastes, and other anthropogenic accumulations formed as a result of industrial activities. The presence of waste or elevated concentrations of valuable components alone is insufficient to classify such accumulations as resource objects. Their geological and economic assessment should integrate the quantity and quality of material, spatial variability, mineral and phase occurrence of critical components, technological recoverability, potential production of marketable products, environmental effects, and overall economic viability. The assessment of technogenic objects is therefore proposed as an integrated system combining resource – technology – product – environmental effect – market. Particular attention should be paid to the application of the United Nations Framework Classification for Resources UNFC to anthropogenic resources, since it enables simultaneous consideration of the confidence in resource estimates, technical feasibility, and environmental and socio-economic viability of a project. This approach supports the transition from viewing industrial waste solely as an environmental liability toward evaluating selected anthropogenic accumulations as potential sources of critical raw materials.

Keywords: technogenic objects, critical minerals, secondary raw materials, anthropogenic resources, geological and economic assessment, UNFC

Вступ

Сучасна трансформація мінерально-сировинного сектору характеризується одночасною дією двох тенденцій. З одного боку, перехід до низьковуглецевої енергетики, електрифікація транспорту, цифровізація та розвиток високотехнологічних виробництв формують зростаючий попит на літій, кобальт, нікель, графіт, рідкісноземельні елементи, галій, германій, індій, тантал, ніобій та інші критичні види сировини. З іншого боку, багаторічна діяльність гірничодобувної, металургійної, енергетичної та інших галузей сформувала значні обсяги техногенних накопичень, у яких частина корисних компонентів залишилася невилученою.

Особливо значний потенціал пов'язаний із відходами гірничодобувної та збагачувальної промисловості. За даними Державної служби статистики України, у 2020 р. в Україні було утворено 462,4 млн т відходів, з яких 391,1 млн т, або близько 84,6 %, припадало на добувну промисловість і розроблення кар'єрів (Державна служба статистики України, 2021). Основними потоками утворення є розкривні породи, відвали пустих порід, хвости збагачення, шлами та некондиційні руди.

Таблиця 1 - Порівняння основних потоків відходів: Україна, ЄС та США (*за даними Eurostat, 2024, U.S. Environmental Protection Agency, 2020*)

Україна	*Європейський Союз*	*США*
1. Добувна промисловість ~85%	1. Будівництво 38%	1. Добувна промисловість
2. Переробна промисловість	2. Добувна промисловість 23%	2. Будівництво ~600 млн т
3. Енергетика	3. Відходи / очищення води	3. Тверді побутові відходи ~292 млн т
4. Сільське господарство	4. Переробна промисловість	4. Відходи енергетики
5. Інші види діяльності	5. Домогосподарства	5. Промислові відходи

Разом із тим поняття «відходи» та «техногенне родовище» є суттєво різними. Для відходів основною задачею управління є безпечне поводження, зменшення їх утворення, зберігання, переробка або видалення. Для техногенного ресурсного об'єкта центральним питанням стає інше: чи існує просторово визначене накопичення матеріалу, кількість, якість, технологічні властивості та економічні параметри якого дозволяють розглядати його як потенційне джерело корисних компонентів.

Метою дослідження є визначення основних особливостей геолого-економічної оцінки техногенних об'єктів як потенційних джерел критичної сировини та формування послідовності переходу від ідентифікації техногенного накопичення до обґрунтування можливості його промислового освоєння.

Особливості формування ресурсної бази техногенних об'єктів

Принциповою особливістю техногенних об'єктів є їх антропогенне походження. На відміну від природних родовищ, просторовий розподіл компонентів у них визначався не лише геологічними процесами, а й технологією видобування та переробки первинної сировини, схемою транспортування відходів, способом їх складування, змінами технологічних режимів підприємства та подальшими фізико-хімічними перетвореннями матеріалу.

Одне хвостосховище може містити матеріали, утворені протягом кількох десятиліть при різних схемах збагачення. Зміни крупності подрібнення, реагентного режиму, коефіцієнтів вилучення основного компонента або складу вихідної руди безпосередньо впливають на склад залишкового матеріалу. Тому середній хімічний аналіз техногенного тіла нерідко має обмежену інформаційну цінність без реконструкції історії його формування.

Для первинного вивчення доцільно використовувати історичну документацію підприємства: дані про обсяги видобутку й переробки, технологічні баланси, склад руди, вилучення основних компонентів, карти та маркшейдерські плани, інформацію щодо періодів експлуатації окремих ділянок накопичувача. Однак такі дані не замінюють сучасного геологічного вивчення.

Наступний етап передбачає визначення геометрії техногенного тіла, його площі, потужності, об'єму, насипної або об'ємної щільності, вологості, гранулометричного складу та просторового розподілу компонентів. Для цього можуть застосовуватися буріння, шурфування, траншеї, геофізичні методи, пробовідбір із поверхні та за глибиною, маркшейдерське знімання та цифрове 3D-моделювання.

Модель техногенного об'єкта повинна відображати не лише вміст корисного компонента, а й технологічні та фізичні властивості матеріалу. Для хвостосховищ важливими можуть бути зональність за крупністю, ступінь окиснення, вологість та

водонасиченість; для відвалів – фрагментація, співвідношення різних типів порід і ступінь вивітрювання; для металургійних шлаків – різні фази кристалізації та неоднорідність за технологічними періодами.

Для геолого-економічної оцінки техногенного об’єкта особливо важливо розрізняти наявні, технологічно доступні для вилучення та економічно ефективні ресурси. Підвищений валовий вміст критичного елемента ще не гарантує можливості його промислового вилучення. Визначальними є мінеральна або фазова форма знаходження елемента, розмір зерен, ступінь розкриття, асоціація з іншими мінералами, розподіл за класами крупності, а також наявність домішок, які ускладнюють переробку або знижують якість продукту.

Наприклад, рідкісноземельні елементи можуть бути присутніми в техногенному матеріалі у відносно значних концентраціях, але знаходитися у фазах, з яких їх вилучення потребує складної гідрометалургійної схеми. В іншому випадку нижчий середній вміст може бути економічно більш привабливим, якщо компонент концентрується у легко відокремлюваній мінеральній фазі.

Технологічні дослідження мають проводитися одночасно з ресурсним оцінюванням. Комплекс досліджень доцільно включати мінералогічний аналіз, визначення форм знаходження цінних компонентів, лабораторне та укрупнено-лабораторне збагачення, гравітаційні, магнітні, флотаційні або гідрометалургійні випробування та складання матеріального балансу.

Для критичної сировини кінцевим показником повинна бути не лише вміст компонентів, а кількість компонентів, які можуть бути переведені в ринковий продукт заданої специфікації. Це можуть бути концентрат, проміжний продукт, оксид, сіль, метал або інший товарний продукт. Такий підхід принципово змінює логіку оцінки: від класичної залежності «тоннаж × вміст» вона переходить до системи:

Геолого-економічна оцінка багатокомпонентних систем

Техногенні об’єкти часто мають комплексний склад. Матеріал, який історично формувався як відхід при вилученні одного головного компонента, може містити інші елементи, що на час первинної переробки не мали промислового значення або не вилучалися через технологічні обмеження.

За узагальненням матеріалів щодо основних потоків техногенних відходів, гірничі відвали та хвости можуть бути потенційними джерелами Fe, Mn, Ti, Zr, Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Li, REE, Sc, Ga, Ge, V та U; металургійні шлаки і шлами – Fe, Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, V, Ti, Al, Sc, Ga, Ge, In та металів платинової групи; золошлакові матеріали – REE, Ge, Ga, Sc і V. Потоки електронних відходів та відпрацьованих батарей, у свою чергу, концентрують Li, Co, Ni, Mn, Cu, Au, Ag, метали платинової групи та рідкісноземельні елементи. Утворення техногенних родовищ

Це обумовлює необхідність комплексної, а не монокомпонентної оцінки. Економічна життєздатність проєкту може визначатися сукупністю декількох продуктів. Компонент, який не є самостійно прибутковим, може суттєво підвищувати загальну економіку проєкту як супутний продукт.

Одночасно необхідно враховувати можливість використання мінеральної частини залишкового матеріалу. Після вилучення металів частина техногенної сировини потенційно може використовуватися як будівельний матеріал, заповнювач, сировина для цементного виробництва або рекультивації. Це зменшує обсяг кінцевих відходів і створює додатковий економічний та екологічний ефект.

Сценарний характер економічної оцінки

При проведенні геолого-економічної оцінки доцільно порівнбвати альтернативні сценарії поводження з накопиченим матеріалом:

1) подальше зберігання без вилучення корисних компонентів. Він може передбачати витрати на моніторинг, підтримання безпеки гідротехнічних споруд, водовідведення, пилопригнічення та майбутню рекультивацію.
2) переробка виключно з метою екологічної реабілітації території або скорочення обсягу накопичення.

3) комплексне вилучення цінних компонентів із виробництвом одного або декількох товарних продуктів та можливим повторним використанням залишку.

Додатковою економічною перевагою техногенного проєкту можуть бути не лише доходи від реалізації продукції, але й уникнені витрати на довгострокове утримання відвалу чи хвостосховища, рекультивацію, поводження з небезпечними матеріалами або зайняття земель.

Водночас техногенні об'єкти мають специфічні витрати: повторне переміщення матеріалу, осушення хвостів, підготовка до переробки, стабілізація об'єкта, очищення вод, поводження з потенційно небезпечними компонентами та приведення території до безпечного стану після завершення робіт. Отже, традиційні показники NPV, IRR, строку окупності та операційних витрат мають доповнюватися оцінкою екологічних ефектів, уникнених витрат та вартості реабілітації території.

Міжнародний контекст та роль UNFC

Значення техногенних ресурсів дедалі чіткіше відображається в європейській сировинній політиці. Регламент ЄС 2024/1252 Critical Raw Materials Act безпосередньо передбачає оцінювання можливостей вилучення критичної сировини з видобувних відходів. Для відповідних об'єктів попередня економічна оцінка має включати, зокрема, кількість і концентрації критичних видів сировини та аналіз їх технічної достіпності [2].

Актуальність такого підходу підтверджується масштабами відходів. У ЄС у 2022 р. будівництво і демонтаж формували 38,4 % загального потоку відходів, а видобування корисних копалин і кар'єри – 22,7 %. [3-4]. Для України, навпаки, характерне особливо значне домінування саме відходів добувної промисловості, що визначає високий потенціал історичних хвостосховищ, відвалів і шламонакопичувачів як об'єктів подальшого ресурсного скринінгу. Утворення техногенних родовищ

Методологічною основою для системного опису таких проєктів може бути United Nations Framework Classification for Resources UNFC. UNECE поширила UNFC на антропогенні ресурси; оновлені додаткові специфікації для їх класифікації були схвалені у 2025 р. (*United Nations Economic Commission for Europe, 2025*).

Перевага UNFC для техногенних об'єктів полягає в тому, що система не обмежується оцінкою тоннажу та вмісту. Вона дозволяє одночасно оцінити три взаємопов'язані аспекти проєкту: E – екологічну та соціально-економічну життєздатність; F – технічну здійсненність та зрілість проєкту; G – ступінь достовірності кількісної оцінки ресурсу.

Для техногенних об'єктів це особливо важливо. Велике хвостосховище з високим потенційним вмістом критичного компонента може мати значний ресурсний потенціал за віссю G, однак залишатися незрілим за F через відсутність підтвердженої технології вилучення або за E через несприятливі економічні, екологічні чи правові умови. Тому поняття «великий ресурс» не повинно автоматично ототожнюватися з «готовим до освоєння проєктом».

Особливості підходу до геолого-економічної оцінки

З урахуванням зазначеного геолого-економічну оцінку техногенного об'єкта доцільно здійснювати послідовно:

1. Ідентифікація об'єкта та попередній скринінг – походження, історія формування, орієнтовний обсяг, потенційні критичні компоненти.
2. Збір та верифікація архівної інформації – технологічні баланси, склад вихідної сировини, маркшейдерські дані, історія складування.
3. Просторове та геологічне вивчення – геометрія об'єкта, пробовідбір, щільність, вологість, гранулометричний склад, 3D-модель.
4. Хімічна і мінералогічна характеристика – вміст основних, попутних і шкідливих компонентів, форми знаходження критичних елементів.
5. Технологічні дослідження – визначення принципової схеми переробки, вилучення, виходу та якості потенційних продуктів.
6. Оцінка ресурсів та матеріального балансу – кількість матеріалу, металу в техногенному тілі, технологічно доступна кількість і прогнозний обсяг продуктів.

7. Екологічна оцінка – вплив існуючого накопичення, зміни ризиків у результаті переробки та поводження з залишками.
8. Економічна оцінка – CAPEX, OPEX, доходи, попутні продукти, уникнені витрати, чутливість до цін, вилучення та масштабу виробництва.
9. Оцінка проєктної зрілості із використанням категорій UNFC.
10. Вибір оптимального сценарію освоєння – повна або селективна переробка, повторне використання матеріалу, комбінований підхід чи збереження об'єкта.

Особливістю запропонованого підходу є трактування геолого-економічної оцінки техногенних об'єктів не як спрощеного аналога оцінки первинного родовища, а як окремої багатокомпонентної системи. Для таких об'єктів ключовим результатом має бути встановлення не лише кількості критичного компонента в накопиченому матеріалі, а економічно ефективної кількості в товарному продукті з урахуванням технологічних характеристик, екологічних ефектів і можливості повторного використання залишкового матеріалу. Це дозволяє перейти від моделі «відхід як екологічна проблема» до моделі «антропогенний матеріал як потенційний ресурс», але лише за умови доведення його кількісних, якісних, технологічних та економічних характеристик.

Висновки

Техногенні об'єкти можуть становити вагоме вторинне джерело критичної сировини, особливо для країн із тривалою історією гірничодобувної та металургійної діяльності. Для України найбільш перспективним напрямом первинного скринінгу є накопичення добувної та збагачувальної промисловості – хвости, відвали, шлами та некондиційні руди, на які припадає основна маса промислових відходів країни.

Водночас факт наявності відходів не є достатнім для віднесення об'єкта до ресурсної бази. Геолого-економічна оцінка повинна підтвердити просторові параметри техногенного тіла, кількість і якість матеріалу, мінеральні форми цінних компонентів, технологічну можливість їх вилучення, одержання товарних продуктів та економічну життєздатність відповідного проєкту.

Для критичної сировини особливе значення має перехід від оцінювання валового вмісту до оцінювання технологічно та економічно ефективного ресурсу. У зв'язку з цим ресурсні, мінералогічні, технологічні, екологічні та економічні дослідження повинні формувати єдину систему.

Застосування UNFC до антропогенних ресурсів дозволяє пов'язати кількісну достовірність ресурсу з технічною зрілістю та соціально-економічною життєздатністю проєкту і є перспективним інструментом для формування портфеля проєктів повторного освоєння техногенних об'єктів. Розвиток такого підходу створює передумови не лише для розширення ресурсної бази критичної сировини, а й для зменшення накопичених екологічних ризиків та практичної реалізації принципів циркулярної економіки.

Список використаних джерел

Державна служба статистики України. (2021). *Промисловість України у 2016–2020 роках: Статистичний збірник*. Державна служба статистики України. Державна служба статистики України zb_prom_16_20.pdf

European Parliament, & Council of the European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. *Official Journal of the European Union*. Eur-Lex https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1746446409816&uri=CELEX%3A32024R1252&utm_source

Eurostat. (2024). *Waste generation by economic activities and households, EU, 2022*. European Commission. European Commission https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/1183.pdf?v=6945944304836461&utm_source

United Nations Economic Commission for Europe. (2025). *Supplementary specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Resources to anthropogenic resources* (ECE/ENERGY/GE.3/2025/8). United Nations. UNECE

https://unece.org/sites/default/files/2025-03/ECE-ENERGY-GE.3-2025-8_UNFCAnthropSpecs.pdf?utm_source

U.S. Environmental Protection Agency. (2020). *Advancing sustainable materials management: 2018 fact sheet*. U.S. Environmental Protection Agency. US EPA https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf?_sp=e2a2178b-cc0f-4df7-b4bf-64e5e0404c3b&utm_source

U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). *National overview: Facts and figures on materials, wastes and recycling*. U.S. Environmental Protection Agency. US EPA https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials?utm_source

References

Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]. (2021). *Promyslovist Ukrainy u 2016–2020 rokakh: Statystychnyi zbirnyk [Industry of Ukraine in 2016–2020: Statistical publication]*. State Statistics Service of Ukraine. [in Ukrainian] Державна служба статистики України zb_prom_16_20.pdf

European Parliament, & Council of the European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. *Official Journal of the European Union*. Eur-Lex https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1746446409816&uri=CELEX%3A32024R1252&utm_source

Eurostat. (2024). *Waste generation by economic activities and households, EU, 2022*. European Commission. European Commission https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/1183.pdf?v=9185585341425544&utm_source

United Nations Economic Commission for Europe. (2025). *Supplementary specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Resources to anthropogenic resources* (ECE/ENERGY/GE.3/2025/8). United Nations. UNECE https://unece.org/sites/default/files/2025-03/ECE-ENERGY-GE.3-2025-8_UNFCAnthropSpecs.pdf?utm_source

U.S. Environmental Protection Agency. (2020). *Advancing sustainable materials management: 2018 fact sheet*. U.S. Environmental Protection Agency. US EPA https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf?_sp=e2a2178b-cc0f-4df7-b4bf-64e5e0404c3b&utm_source

U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). *National overview: Facts and figures on materials, wastes and recycling*. U.S. Environmental Protection Agency. US EPA https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials?utm_source