

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра економіки, права та управління бізнесом

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

(підпис)

«____» _____ 20__р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістра

зі спеціальності 076 «Підприємництво та торгівля»
за освітньою програмою професійного спрямування
«Економіка, планування та управління бізнесом»
на тему: **«ІНСТИТУЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗВИТКУ
ПЕРЕРОБКИ ТЕХНОГЕННИХ ВІДХОДІВ ВУГІЛЬНОЇ
ПРОМИСЛОВОСТІ В КОНТЕКСТІ РЕСУРСНОЇ БЕЗПЕКИ
УКРАЇНИ»**

Виконавець:

студентка ЦЗФН

Слюсаренко Лариса Іванівна _____

Науковий керівник:

д.е.н, професор

Андрейченко Андрій Вадимович _____

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МІНЕРАЛЬНО-СИРОВИННОГО ПОТЕНЦІАЛУ УКРАЇНИ.....	6
1.1. Геолого-економічні аспекти вугільної та торф'яної мінерально-сировинної бази.....	6
1.2. Поточний рівень промислового освоєння мінерально-сировинної бази.....	9
1.3. Стратегічне значення мінерально-сировинної бази для економічної безпеки країни.....	13
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОГЕННИХ ВІДХОДІВ ЯК ДЖЕРЕЛА РЕСУРСНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ВИКЛИКІВ.....	16
2.1. Галузева структура техногенного навантаження та геоекономічні наслідки накопичення відходів.....	16
2.2. Перспективні методи переробки відходів.....	27
2.3. Економічні стимули та пріоритети здійснення «зеленої модернізації» щодо управління відходами.....	47
РОЗДІЛ 3. ПРІОРИТЕТИ ДЕРЖАВНОЇ ПОЛІТИКИ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРЕРОБКИ ТЕХНОГЕННИХ ВІДХОДІВ ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	52
3.1. Інституційне забезпечення переробки техногенних відходів вугільної промисловості.....	52
3.2. Особливості управління відходами відповідно до норм ЄС	53
3.3. Геоекономічна оцінка ризиків екзогенних геологічних процесів.....	57
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72

ВСТУП

Актуальність дослідження. Зростання масштабів накопичення техногенних відходів вугільної промисловості в Україні створює значні екологічні, економічні та соціальні загрози. Техногенні маси впливають на стан ґрунтів, атмосферного повітря, поверхневих і підземних вод, сприяють розвитку екзогенних геологічних процесів та формують довгострокові ризики для життя і здоров'я населення. В умовах геоекономічної нестабільності та дефіциту мінерально-сировинних ресурсів особливого значення набуває перехід до циркулярної моделі управління відходами та створення ефективної інституційної системи їх переробки. Відходи вугільної промисловості стають не лише екологічною проблемою, а й потенційним джерелом вторинної сировини, що посилює їх роль у забезпеченні ресурсної безпеки держави.

Мета дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є теоретичне обґрунтування та аналіз інституційних, економічних і технологічних засад розвитку переробки техногенних відходів вугільної промисловості в контексті зміцнення ресурсної безпеки України.

Для досягнення поставленої **мети** в роботі необхідно виконати такі **завдання**:

1. Проаналізувати стан і потенціал мінерально-сировинної бази України.
2. Дослідити масштаби, структуру та екологічні наслідки накопичення техногенних відходів.
3. Оцінити перспективні технології та методи переробки техногенної сировини.
4. Визначити основні економічні та інституційні стимули «зеленої модернізації» в управлінні відходами.
5. Проаналізувати відповідність українського законодавства нормам ЄС у сфері поводження з відходами.
6. Провести геоекономічну оцінку впливу екзогенних геологічних процесів на території з техногенним навантаженням.

7. Сформувати пропозиції щодо вдосконалення інституційної моделі переробки техногенних відходів вугільної промисловості.

Об'єкт дослідження – система управління техногенними відходами вугільної промисловості України.

Предмет дослідження – інституційні, економічні та технологічні механізми переробки техногенних відходів вугільної промисловості.

Методи дослідження. У роботі застосовано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів, зокрема: аналіз і синтез, системний та порівняльний підходи, економіко-географічний аналіз, методи статистичної обробки даних, гео економічне моделювання, а також аналіз нормативно-правової бази України та ЄС.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна полягає у теоретичному узагальненні та систематизації інституційних засад управління техногенними відходами вугільної промисловості, а також у визначенні перспективних напрямів їх переробки в контексті ресурсної безпеки України. У роботі уточнено роль сучасних біотехнологічних методів переробки, обґрунтовано необхідність адаптації європейських принципів циркулярної економіки та визначено гео економічні ризики, пов'язані з техногенним навантаженням.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення полягає в можливості використання результатів роботи при розробці державних та регіональних програм управління відходами, формуванні кластерів переробки техногенної сировини, удосконаленні нормативно-правового забезпечення, а також у впровадженні екологічно безпечних технологій переробки відходів у вугільних регіонах.

Інформаційна база дослідження: наукові публікації та монографічні видання українських і зарубіжних вчених, нормативно-законодавчі акти України,

матеріали наукових конференцій, результати власних досліджень, звіти та аналітичні матеріали відповідних державних органів.

Структура та обсяг роботи: Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел (36 найменувань). Загальний обсяг роботи становить 75 сторінок. Основний зміст викладено на 71 сторінці. Робота містить 6 таблиць, 7 рисунків.

Публікації та апробація результатів дослідження. За результатами проведених досліджень приймала участь у XI Міжнародній науково-практичній конференції «Економіко-правові аспекти господарювання: сучасний стан, ефективність та перспективи».

Андрейченко А.В., Слюсаренко В.Д., Слюсаренко Л.І. Відходи паливно-енергетичного комплексу України – сировина для виробництва рідкісних металів Економіко-правові аспекти господарювання: сучасний стан, ефективність та перспективи: матеріали XI Міжнар. наук.-практ. конф., 10–11 жовтня 2025 р. Одеса, 2025. С. 20–23.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МІНЕРАЛЬНО-СІРОВИННОГО ПОТЕНЦІАЛУ УКРАЇНИ

1.1. Геолого-економічні аспекти вугільної та торф'яної мінерально-сировинної бази

Мінерально-сировинна база України характеризується значною різноманітністю та високим рівнем концентрації корисних копалин, що зумовлено складною геологічною будовою території. У надрах країни ідентифіковано понад 20 тис. родовищ і проявів мінеральної сировини, які репрезентують 117 її видів. Із цієї кількості понад 8280 родовищ підтверджено як промислово значущі, що забезпечило їх включення до Державного балансу запасів корисних копалин (табл.1.1).

Таблиця 1.1.

Державний баланс запасів корисних копалин

Основна корисна копалина	Кількість родовищ на державному балансі	Кількість родовищ у розробці / % загальної їх кількості
Горючі:	2411	642/26,6
- Газоподібні (газ природний)	330	204/61,8
- Рідкі (нафта)	76	45/59,2
- Тверді горючі (у т.ч. уран)	2005	393/19,6
Металічні	107	33/30,8
Неметалічні (сировина)	4332	1334/30,8
Води підземні (і лікувальні грязі):	1430	
- Води питні і технічні	1186	
- Води мінеральні	225	
- Води промислові	1	
- Води термальні	7	
- Грязі лікувальні	11	
Загальна кількість родовищ	8280	2724/32,9
Загальнодержавного значення	6032	72,9
у т.ч. стратегічні	37	
Місцевого значення	2248	27,1

Мінерально-сировинна база України включає широкий спектр паливних (вугілля, нафта, природний газ, торф), рудних (залізні, марганцеві, титанові, уранові та інші руди), а також нерудних корисних копалин, серед яких значні поклади будівельної, технічної та хімічної сировини. Комплексність і кількісне різноманіття цих ресурсів визначають стратегічну важливість мінерально-сировинного потенціалу для забезпечення економічної безпеки держави та створюють підґрунтя для функціонування експортоорієнтованих виробництв [1].

Балансові запаси кам'яного вугілля України, сконцентровані переважно в Донецькому та Львівсько-Волинському вугленосних басейнах, становлять близько 95% загальнонаціонального ресурсу, що свідчить про високий ступінь територіальної локалізації вуглевидобувного потенціалу. З геолого-економічних позицій це зумовлює нерівномірність рівня освоєності ресурсів та підвищує залежність енергетичного сектору держави від політико-економічної стабільності окремих регіонів. Кам'яне вугілля представлено повним набором марок від Д до А, що створює можливості для формування диверсифікованої структури його промислового використання: енергетичного, коксохімічного та технологічного.

Висока частка коксівного вугілля (31,1%) та антрацитів (14,4%) є суттєвою конкурентною перевагою у контексті металургійної промисловості та термохімічних технологій. З економічної точки зору, саме ці категорії вугілля забезпечують найбільшу додану вартість на етапах переробки та мають стабільний зовнішній і внутрішній попит. Проте доступність до частини родовищ на територіях активних бойових дій або тимчасової окупації обмежує інвестиційну привабливість та ускладнює реалізацію довгострокових видобувних проєктів.

У Львівсько-Волинському басейні ведеться будівництво шахти потужністю 0,9 млн т/рік, що свідчить про існування інвестиційного інтересу до регіону, зумовленого відносно кращими гірничо-геологічними умовами (менші глибини залягання, нижчий рівень газоносності пластів) та сприятливішою логістично-транспортною доступністю. Наявність 25 продуктивних площ, з яких

експлуатується лише 9, демонструє значний резерв для подальших інвестиційних проєктів, за умови проведення дооцінки ресурсів та модернізації інфраструктури.

Вугільні ресурси Луганської області, що перебувають під контролем України, оцінюються у 3297 млн т, проте інтенсивна розробка здійснюється лише на 14% запасів. Геолого-економічний аналіз свідчить, що основним обмежуючим фактором є військово-політична ситуація, зношеність гірничодобувних потужностей та потреба у технологічній модернізації шахтного фонду. За умов стабілізації ситуації регіон може стати об'єктом масштабних інвестицій у відновлення та розвиток кластерної вугільної інфраструктури.

Буре вугілля Дніпровського басейну та Закарпатської площі характеризується нижчими енергетичними параметрами, проте має перспективи використання як сировина для брикетування, газифікації та хімічної переробки. Новодмитрівське родовище, з виробничим потенціалом 9 млн т/рік, є одним із найпривабливіших інвестиційних об'єктів у сегменті буровугільної промисловості. Його продукція за технологічними параметрами придатна для отримання бітумів і гірського воску – матеріалів із високою товарною вартістю та значним ринковим попитом у нафтохімічній та полімерній промисловості.

Запаси бурого вугілля (5,2% від загальнодержавних) здебільшого не залучені до промислового видобутку, що вказує на можливість розширення ресурсної бази в енергетичних регіонах центральної частини країни, особливо у зв'язку з потребою диверсифікації джерел палива та заміщення імпортних енергоносіїв.

У структурі торф'яних ресурсів України обліковано 682 родовища, з яких понад 40 періодично розробляються. Значна частка нерозроблених запасів свідчить про низький рівень використання цього виду палива та недостатній розвиток переробної інфраструктури. Геолого-економічні умови родовищ торфу характеризуються низькою собівартістю видобутку, простотою технологічної схеми та високою доступністю ресурсів, що робить галузь потенційно

інвестиційно привабливою у сегменті місцевих видів палива, агровиробництва та медичних технологій [2-9].

Провідна роль «Житомирторфу» як базового підприємства галузі визначається наявністю власної інфраструктури, виробничих потужностей та налагоджених виробничих циклів з виготовлення фрезерного торфу та агроторфу. За наявності запасів на понад 50 років підприємство може стати основою для створення інвестиційного кластера з виробництва торфобрикетів, субстратів для рослинництва, теплоізоляційних матеріалів та органо-мінеральних добрив [10].

У Рівненській та Волинській областях значну частку мінерально-сировинної бази становлять паливно-енергетичні корисні копалини. Особливо цінним ресурсом є сапропель, запаси якого (7,65 млн т лише у Рівненській області) потенційно можуть стати основою для розвитку високорентабельного сектору органічних добрив, кормових добавок та рекреаційно-медичної індустрії. Проте відсутність промислової розробки свідчить про недооцінений інвестиційний потенціал цієї сировини та недостатню увагу до формування ринку органо-мінеральних продуктів в Україні [11-15].

1.2. Поточний рівень промислового освоєння мінерально-сировинної бази

Поточний рівень промислового освоєння мінерально-сировинного потенціалу України свідчить про значну інтенсивність використання ресурсної бази. Нині експлуатується понад 2000 родовищ, що охоплюють приблизно 100 видів корисних копалин. Сукупні запаси цих родовищ становлять від 40 до 75% загальних розвіданих запасів найбільш економічно важливих мінеральних ресурсів [17]. На основі їх видобутку функціонує розгалужений комплекс гірничодобувних, збагачувальних і переробних підприємств, чисельність яких перевищує дві тисячі. Ці підприємства формують структурний каркас мінерально-

сировинного сектору національної економіки та забезпечують діяльність металургійної, хімічної, будівельної, машинобудівної та енергетичної галузей [16].

У Державному балансі запасів корисних копалин України обліковуються 60 родовищ залізних руд, сумарні промислові запаси яких становлять 337 млн т. Ці об'єкти формують основу національної сировинної бази чорної металургії й визначають стратегічний характер гірничо-металургійного комплексу як одного з ключових секторів макроекономічної структури держави. У 2020 р. видобування рудної сировини здійснювалося на 26 родовищах, що розроблялися 12 гірничодобувними підприємствами із застосуванням підземних і відкритих гірничих робіт (7 шахт та 13 кар'єрів). Висока концентрація виробничих потужностей та наявність підприємств глибокої переробки забезпечують конкурентоспроможність української залізничної продукції на світових ринках.

На прикладі Кіровоградської області функціонує низка комплексних родовищ кольорових металів. Зокрема, Липовеньківське (Західна та Шкільна ділянки), Деренюське, Грушківське та Пушківське родовища містять 8,012 млн т запасів нікелю та кобальту, що становить 27,3 % від загальноукраїнських підтверджених запасів. Високий рівень розвідки та сприятливе геологічне середовище забезпечують інвестиційну привабливість цих об'єктів для потенційних виробників акумуляторних матеріалів та сплавів.

У межах Петрівського району здійснюється промислова експлуатація Петрівського та Артемівського родовищ, які розробляються ПрАТ «Центральний ГЗК». ПрАТ «Північний ГЗК» веде видобуток на Ганнівському родовищі залізистих кварцитів, протяжність якого становить близько 17 км. Вказані об'єкти формують один із найбільш інтенсивних гірничодобувних кластерів у межах Криворізького залізничного басейну.

Україна посідає провідні позиції у світі за споживанням та виробництвом марганцевої продукції (феромарганець, силікомарганець, металевий марганець). На балансі враховані родовища Нікопольського, Федорівського та Велико-

Токмацького басейнів, а також техногенне родовище «Шламосховище ім. Максимова», що за масштабами запасів не поступається природним об'єктам.

Нікопольський марганцеворудний басейн є одним з найбільших у світі; високий металогенічний потенціал підтверджують Оріхово-Павлоградська та Чортомлицька магнітні аномалії. Зосередженість такого масиву стратегічної сировини визначає важливі передумови для розвитку внутрішньої феросплавної галузі та збільшення експортного потенціалу [1, 3, 8].

Запаси руд хрому обліковуються за двома родовищами – Капітанівським та Липовеньківським; запаси Високопільського родовища бокситів також враховані в балансі, проте станом на 01.01.2022 р. ці об'єкти не розроблялися через недостатню інвестиційну активність та потребу модернізації інфраструктури. Їх подальше освоєння може стати основою імпортозаміщення у виробництві алюмінієвої продукції.

Україна володіє значними запасами титанових руд, що належать до найвагоміших у глобальному масштабі. У Державному балансі обліковується багато родовищ, більшість із яких мають високий ступінь геологічної вивченості. Наразі розробляється 9 родовищ, що забезпечує суттєвий внесок у світовий ринок титанової сировини.

У Кіровоградській області розташовані Бирзулівське, Лікарівське та Аврамівське родовища. На базі Бирзулівського родовища ТОВ ВКФ «Велта» ввело в експлуатацію гірничо-збагачувальний комбінат, який майже десятиліття стабільно забезпечує видобуток і переробку ільменіту та контролює приблизно 2 % світового ринку титанової сировини. Проведене геологічне дооцінювання Лікарівської ділянки дозволило збільшити прогностичні ресурси та створити можливості для розширення виробництва. Національна акціонерна компанія «Надра України» здійснює пошуково-оцінювальні роботи на Аврамівському родовищі, що має значний потенціал для залучення прямих іноземних інвестицій після підтвердження промислових запасів.

Запаси кобальту враховані за 12 родовищами (11 силікатно-кобальт-нікелевих та одне сульфідно-мідно-нікелеве) у межах Побужжя та середнього Придніпров'я. Ця група корисних копалин має особливе стратегічне значення з огляду на зростання світового попиту на кобальт у виробництві акумуляторів для електротранспорту та систем енергозбереження.

Перспективним є освоєння Західно-Лаврівської ділянки, де підготовлено до розробки поклади силікат-кобальт-нікелевих руд. Геолого-інвестиційні передумови свідчать про можливість формування на базі цих родовищ кластеру виробництва сплавів і катодних матеріалів.

Державним балансом враховано 11 родовищ ртуті, з яких у Донецькій області розташовано сім. До 1995 року розроблялося Микитівське родовище, проте нині рудодобувні роботи припинені. Подальше освоєння стримується екологічними та технологічними факторами, однак за умов застосування сучасних технологій переробки можливе економічно доцільне відновлення видобутку.

Геологорозвідувальні роботи останніх років дали позитивні результати в межах Пержанського рідкіснометалевого району, який оцінюється як перспективна сировинна база рідкісних та рідкісноземельних металів. За світовими аналогами, такий об'єкт здатен забезпечити стабільне функціонування гірничодобувної галузі Полісся протягом щонайменше 100 років.

Також визначено перспективи відкриття родовищ сульфідного нікелю в Красногірсько-Житомирській зоні північного заходу Українського щита – регіоні, який отримує все більшу увагу міжнародних інвесторів у зв'язку зі зростанням попиту на нікель для високотехнологічних галузей.

Геологорозвідувальні роботи останніх років дали позитивні результати в межах Пержанського рідкіснометалевого району, який оцінюється як перспективна сировинна база рідкісних та рідкісноземельних металів. За світовими аналогами, такий об'єкт здатен забезпечити стабільне функціонування гірничодобувної галузі Полісся протягом щонайменше 100 років.

Також визначено перспективи відкриття родовищ сульфідного нікелю в Красногірсько-Житомирській зоні північного заходу Українського щита – регіоні, який отримує все більшу увагу міжнародних інвесторів у зв'язку зі зростанням попиту на нікель для високотехнологічних галузей [1, 2, 7, 9, 10, 12, 17].

1.3. Стратегічне значення мінерально-сировинної бази для економічної безпеки країни

В Україні у липні 2021 року схвалений перелік металічних руд та неметалічних корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави (пункт 1 рішення Ради національної безпеки і оборони України "Про стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави", введеного в дію Указом Президента України від 23 липня 2021 року № 306/2021), як перший крок до законодавчого врегулювання цього питання.

Беручи до уваги обмеженість запасів відповідних корисних копалин, а також їхнє географічне розташування на території різних держав, крім національних переліків корисних копалин та компонентів стратегічного та (або) критичного значення, держави, а в окремих випадках – об'єднання держав, формують стратегічні партнерства у сфері стратегічної та критичної мінеральної сировини з метою диверсифікації джерел та убезпечення шляхів постачання мінеральної сировини.

Зокрема, прийнятий Європейським парламентом Регламент Critical Raw Materials Act, що набрав чинності у квітні 2024 року, засвідчує нагальну потребу зменшення залежності та підвищення стійкості важливих ланцюгів постачання мінеральної сировини та продукції її переробки в Європейському Союзі, збільшення циркулярності критичної сировини, диверсифікації джерел та

убезпечення шляхів її постачання, зокрема шляхом посилення зовнішнього партнерства [17].

Україною вже укладені Меморандум про взаєморозуміння між Європейським Союзом та Україною щодо стратегічного партнерства у сфері мінеральної сировини, а також Меморандум про взаєморозуміння між Урядом України та Урядом Сполучених Штатів Америки щодо співробітництва з метою посилення ланцюгів постачання у секторі критичних мінеральних ресурсів для енергетики, національної безпеки та економічного розвитку.

За таких умов на глобальному ринку, враховуючи ресурсний потенціал України, наша держава має великі можливості для нарощування власних промислових потужностей, що функціонують на основі стратегічної і критичної мінеральної сировини, та стимулювання економічного зростання шляхом впровадження сучасних технологій та інтеграції у глобальні ланцюги постачання критичних матеріалів і продукції на їх основі, приділяючи особливу увагу збагаченню та (або) переробці таких корисних копалин, включаючи рециклінг, як основу інтеграції України у глобальні ланцюги створення доданої вартості [1, 4, 7, 17].

Висновки до розділу 1

Багата та різноманітна ресурсна база: Україна володіє значною та різноманітною мінерально-сировинною базою, що включає понад 20 тисяч родовищ і проявів 117 видів корисних копалин. З них 8280 родовищ є промислово значущими і внесені до Державного балансу. Ця база охоплює паливно-енергетичні (вугілля, газ, нафта, торф), металеві (залізні, марганцеві, титанові, нікелеві, кобальтові руди тощо) та неметалеві корисні копалини.

Висока концентрація та стратегічне значення ключових ресурсів: Ключові ресурси, такі як кам'яне вугілля (з високою часткою коксівного та антрацитів), залізні та марганцеві руди, титанові руди, мають високу ступінь територіальної

концентрації та формують основу для стратегічних галузей економіки – енергетики, металургії та важкої промисловості. Вони забезпечують конкурентні переваги на світових ринках.

Нерівномірність освоєння та вплив зовнішніх факторів: Поточний рівень промислового освоєння ресурсної бази є високим (експлуатується понад 2000 родовищ), проте спостерігається значна нерівномірність. Доступ до частини найбагатших родовищ (наприклад, у Донецькому басейні) обмежений через складну військово-політичну ситуацію, що створює ризики для енергетичної та економічної безпеки. Інвестиційна активність зосереджена в регіонах із сприятливішими умовами (наприклад, Львівсько-Волинський басейн).

Стратегічний пріоритет для економічної безпеки: Мінерально-сировинна база визнана стратегічно важливою для стійкого розвитку та обороноздатності України. Інтеграція в європейські та глобальні ініціативи (наприклад, Critical Raw Materials Act ЄС) через укладені меморандуми про партнерство створює передумови для залучення інвестицій, трансферу технологій та інтеграції українських ресурсів у глобальні ланцюги поставок критичної сировини. Акцент на глибокому переробленні та рециклінгу визначається як основа для створення доданої вартості.

Таким чином, Україна має потужний, хоча й не в повній мірі реалізований, мінерально-сировинний потенціал. Його раціональне та інноваційне освоєння, з урахуванням геоекономічних викликів і євроінтеграційних пріоритетів, є ключовим чинником для забезпечення ресурсної та економічної безпеки країни.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОГЕННИХ ВІДХОДІВ ЯК ДЖЕРЕЛА РЕСУРСНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ВИКЛИКІВ

2.1. Галузева структура техногенного навантаження та геоекономічні наслідки накопичення відходів

Інтенсивне промислове освоєння багатой мінерально-сировинної бази України, про яке йшлося в першому розділі нерозривно пов'язане з утворенням величезної кількості техногенних відходів [18].

Основне екологічне навантаження у структурі промисловості України формують:

- хімічна промисловість (утворення токсичних шламів, кислотних та сольових відходів),
- металургійний комплекс (шлаки, пил, шламові маси),
- гірничодобувний сектор (розкривні породи, хвости збагачення, шламонакопичувачі),
- електроенергетика, особливо теплова (золовідвали, а також шлакові відходи).

Ці галузі характеризуються високою матеріалоемністю й традиційно орієнтовані на екстенсивні моделі виробництва, що передбачають значні обсяги природокористування і супроводжуються формуванням масштабних потоків промислових відходів.

За даними державної статистичної звітності, протягом останніх років в Україні щорічно утворюється понад 450 млн тонн відходів. При цьому 94–95 % цих обсягів припадає саме на видобувну та переробну промисловість, що підтверджує відповідно надзвичайно високий рівень техногенної залежності економіки.

Таблиця 2.1

**Обсяги за утворення відходів за класифікаційними
угрупованнями державного класифікатора відходів (ДК 005-96)**

Найменування відходів за класифікаційними угрупованнями державного класифікатора відходів (ДК 005-96)	Код за ДК 005-96 (група, код)	Роки				
		2022		2023		2024
		Обсяг утворених відходів, тис. тонн	%	Обсяг утворених відходів, тис. тонн	%	Обсяг утворених відходів, тис. тонн
Усього (промисловість)		441516,50	100,00	462373,50	100,00	
відходи видобування вугілля кам'яного, лігніту (вугілля бурого), торфу	A.4 10	14571,04	3,30	14829,43	3,21	15867,49
відходи видобування нафти сирої та газу природного; відходи, які утворилися від надання послуг щодо видобування нафти та газу (крім розвідувальних послуг)	A.5 111	179,70	0,04	79,88	0,02	78,13
відходи видобування та збагачення руд уранових і торієвих	A.6 12	617,38	0,14	866,69	0,19	
відходи видобування руд металевих	A.7 13	339541,30	76,90	361771,40	78,24	370815,69
відходи видобування корисних копалин інших	A.8 14	37564,11	8,51	41102,78	8,89	
відходи виробництва продуктів харчових та напоїв	A.9 15	7263,91	1,65	5614,28	1,21	5283,03
відходи виробництва виробів тютюнових	A.10 16	2,84	0,00	2,11	0,00	1,87
відходи виробництва коксу, продуктів нафтоперероблення та палива ядерного	A.17 23	216,38	0,05	191,08	0,04	
відходи виробництва хімікалій, продукції хімічної та волокна штучного	A.18 24	464,37	0,11	473,63	0,10	
відходи виробництва виробів гумових та пластмасових	A.19 25	13,10	0,00	9,97	0,00	
відходи виробництва металів основних	A.21 27	16455,37	3,73	14766,41	3,19	15283,23
Всього		416889,49	94,4222	439707,6	95,0979	

Така структура відходів свідчить, що:

1. Промисловість генерує переважно масові мінеральні відходи IV класу небезпеки, які мають низькі показники токсичності, але становлять колосальне навантаження на території, водний баланс і інженерну стійкість ландшафтів.
2. Інфраструктура перероблення не відповідає реальним потокам: доступні технології дозволяють переробляти лише незначну частку промислових мас.
3. Рівень використання відходів як вторинних ресурсів залишається критично низьким, а значна частина потенційно корисних матеріалів потрапляє у відвали чи сховища.

Обсяги утилізації відходів в Україні протягом останніх років стабільно перебувають у діапазоні 21,7–24,5%, що суттєво відстає як від середнього рівня перероблення в країнах ЄС (близько 45%), так і від показників технологічно розвинутих країн, де рівень рециклінгу перевищує 55–60% (Німеччина, Нідерланди, Австрія). Водночас 75–78% відходів від річного обсягу їх утворення підлягає остаточному видаленню (захороненню або складуванню), що створює зростаючий антропогенний прес на компоненти довкілля [18-20].

Сумарний обсяг відходів, накопичених за період експлуатації промислових, комунальних та інших об'єктів у спеціально відведених місцях і спорудах, оцінюється приблизно у 16 млрд тонн, що еквівалентно понад 350 т на одну особу населення. Даний показник є одним із найвищих у Європі й свідчить про критичну структурну неефективність моделі управління техногенними масами.

У промисловому секторі України сформувався комплекс системних чинників, які зумовлюють перманентне погіршення стану довкілля та високий рівень екологічних ризиків [5, 6, 15, 16, 21]:

1. Технологічна архаїчність виробництв

Переважає частина промислових потужностей функціонує на основі технологій 1970–1990-х років, що характеризуються:

- надвисокою енергомісткістю (у 2–3 рази більшою порівняно з країнами ОЕСР),
- матеріаломісткістю, що спричиняє збільшення питомих обсягів відходоутворення,
- недостатньою інтегрованістю систем замкнених водних та матеріальних циклів.

У міжнародних рейтингах енергоефективності Україна стабільно посідає нижні позиції, а інтенсивність утворення відходів на одиницю ВВП залишається у 4–6 разів вищою, ніж у країнах ЄС [22-23].

2. Надвисокий рівень концентрації промислових об'єктів

Індустріальні зони Дніпровського, Донецького, Криворізького та Придніпровського регіонів сформували гіперконцентровані техногенні агломерації, у межах яких локалізовано до 60–70% усіх промислових відходів України. Це приводить до:

- просторового накладання техногенних потоків,
- перехресного забруднення ґрунтів та поверхневих вод,
- прискорення деградаційних ландшафтних процесів.

3. Диспропорційна структура промислового виробництва

Економіка України залишається орієнтованою на важку індустрію:

- металургійний сектор,
- гірничодобувна промисловість,
- хімічне виробництво,
- теплоенергетика.

Ці галузі генерують 94–95% загальних обсягів відходів й мають найнижчі показники впровадження циркулярних технологій [24].

4. Відсутність повноцінної інфраструктури природоохоронних систем

У багатьох промислових об'єктах:

- очисні споруди перебувають у незадовільному стані або повністю вийшли з експлуатації,
- оборотні та повторно-замкнені цикли водопостачання розвинені недостатньо,
- системи поводження із шлаками, шлаками, золошлаковими відходами працюють із перевантаженням.

Рівень використання технологій рециклінгу фосфогіпсів, металургійних шлаків, вугільних відвалів у 5–10 разів нижчий, ніж у країнах ЄС.

5. Відсутність дієвих економічних стимулів «зеленої модернізації»

Національна екологічна політика практично не використовує:

- екологічне оподаткування у європейських параметрах (carbon tax, landfill tax),
- систему розширеної відповідальності виробника (EPR),
- механізми «зелених» інвестицій та ESG-фінансування.

Відсутність фінансових стимулів гальмує впровадження маловідходних та безвідходних технологій.

6. Інституційні прогалини та фрагментація екологічного контролю

Недостатня координація між міністерствами та відомствами, дублювання повноважень і слабкість контролюючих інституцій призводять до:

- неможливості ефективного нагляду за об'єктами накопичення відходів,
- втрати даних щодо обсягів, складу та класу небезпеки відходів,
- поширення «тіньового» сектору поводження з відходами,
- відсутності актуальних реєстрів потенційно небезпечних об'єктів.

Система моніторингу фактично не покриває території ліквідованих або збанкрутілих підприємств, де розташовані десятки мільйонів тонн техногенних мас [25].

Високий рівень складування відходів означає, що 2/3 промислових територій України зазнають системного впливу факторів:

- пилового навантаження,
- фільтраційного забруднення ґрунтових вод,
- вторинних хімічних реакцій у масивах складування (самозаймання, утворення кислотних дренажів).

Зона наднормативного забруднення часто виходить за межі стандартної 300-метрової СЗЗ, іноді охоплюючи площі в радіусі 1,5–3 км.

Гірничодобувна промисловість України, як одна з базових галузей національної економіки, формує системні та багатокомпонентні впливи на довкілля, що проявляються у зміні природних ландшафтів, трансформації гідрогеологічних умов, погіршенні якості атмосферного повітря та водних ресурсів, а також у деградації ґрунтів. Масштабність цих впливів зумовлена як високою концентрацією видобувних підприємств, так і домінуванням технологій, що базуються на інтенсивному вилученні природних ресурсів і генеруванні значних обсягів відходів.

Процеси видобування мінеральної сировини супроводжуються вилученням значних земельних площ під відвали, шламосховища та ставки-накопичувачі. Такі техногенні об'єкти призводять до порушення ґрунтового покриву, руйнування гумусового шару та втрати екосистемних функцій територій, які могли б використовуватись для сільськогосподарського виробництва або природоохоронної діяльності [7, 10,12, 13, 15].

Відкриті кар'єри, глибина яких часто сягає 400–600 м, створюють значні зміни рельєфу. Площі відвалів, що в кілька разів перевищують площу самих кар'єрів, формують техногенні ландшафти з підвищеною ерозійною активністю. Наймасштабніші порушення зафіксовані у Придніпровському гірничо-металургійному регіоні, зокрема на Криворіжжі, де знищено понад 18 тис. га земель, що свідчить про високу просторічну концентрацію антропогенно-техногенного впливу.

Вплив гірничодобувної діяльності на водні ресурси є багатофакторним. Зміна запасів, режиму руху та якості ґрунтових вод є наслідком водовідливу, дренажних робіт і формування штучних водних резервуарів.

Рудникові та шахтні води, що містять хлористі сполуки, сірчану кислоту, солі важких металів (заліза, марганцю, міді), спричиняють підвищення мінералізації водних об'єктів та токсикологічні ризики. В ряді регіонів (Луганщина, Донецчина, Кривбас) фіксується хронічне засолення річок та порушення водно-міграційних процесів, що негативно впливає на біорізноманіття та екологічний стан водних екосистем [6, 7, 18, 20].

Прогресуючі процеси підтоплення, типові для територій інтенсивної розробки надр, часто спричиняють вторинне підтоплення житлових масивів, інфраструктури та сільськогосподарських угідь.

Гірничодобувні підприємства є значним джерелом пилогазових викидів, які формуються під час вибухових робіт, дроблення порід та транспортування гірничої маси. Викиди оксидів сірки, азоту, вуглецю, важких металів та дрібнодисперсного пилу сприяють формуванню локальних зон підвищеної концентрації забруднювальних речовин, що призводить до погіршення якості повітря та збільшення ризиків для здоров'я населення.

Самозаймання териконів, поширене у Донбасі, створює додаткове джерело теплового та хімічного забруднення, що супроводжується викидом токсичних газів та продуктів неповного згоряння органічних компонентів [24-25].

Підземний видобуток зумовлює осідання земної поверхні, величина якого становить у середньому 25% від потужності вийнятих пластів. Провали над відпрацьованими шахтами глибиною 40–60 м та завдовжки сотні метрів становлять загрозу для будівель, інженерних мереж та природних екосистем.

У разі поєднання зон зсувів із гірськими схилами виникають масштабні зсувні процеси об'ємом у мільйони кубічних метрів, що ускладнює інженерно-геологічні умови регіону.

Винесення глибинних порід, які часто мають високий вміст токсичних елементів, на поверхню відвалів спричиняє погіршення якості ґрунтів, їх закислення або засолення. Поверхневий стік, насичений шкідливими компонентами, призводить до забруднення водних об'єктів та формування довготривалих геохімічних аномалій.

За орієнтовними оцінками, для відкритого видобування 1 млн т корисних копалин на рік необхідно близько 100 га земельних угідь, що свідчить про високий рівень земельної інтенсивності галузі. Наслідком є деградація біологічної продуктивності, зниження стійкості екосистем і втрата рекреаційного потенціалу територій.

Систематичне втручання людини в геологічне середовище призвело до накопичення на поверхні планети мільярдів кубічних метрів промислових відходів, що формують глобальні ризики для довготривалого функціонування біосфери. В Україні проблема накопичення відходів має особливо масштабний характер, що посилює антропогенний пресинг на природні системи та створює загрози для здоров'я людини.

Забруднення атмосферного повітря, поверхневих і підземних вод та ґрунтів є наслідком не лише видобувних процесів, а й відсутності ефективних природоохоронних технологій, недосконалості систем управління відходами та недостатнього рівня екологічного контролю [18,19, 26].

Порівняно з країнами ЄС, українська гірничодобувна промисловість має значно менший рівень регуляції та технологічної модернізації, що посилює ризики екологічного навантаження.

Висока питома інтенсивність відходів (в Україні, як уже зазначалося, великі обсяги гірничих порід і відвалів) порівнюється з інтенсивними потоками відходів у деяких європейських країнах, де гірниче законодавство більш жорстке.

При цьому, хоча в ЄС переважна частина гірничих відходів – «ненебезпечні», накопичення навіть таких мас становить дуже серйозну геоекологічну проблему.

Україна може навчитися з європейської практики – зокрема введенням жорсткіших екологічних стандартів, підвищенням ефективності водного менеджменту, розвитку технологій утилізації хвостів і відвалів, а також застосуванням підходів циркулярної економіки у гірничому секторі.

Таблиця 2. 2.

Порівняльна таблиця: гірничі відходи в Україні та ЄС

Показник	Україна	ЄС (середнє)	Коментар / Інтерпретація
Загальний обсяг утворених відходів (річний)	~450 млн т	~2,2 млрд т	Україна генерує менше відходів у абсолютних величинах, але структура сильно відрізняється.
Частка гірничих відходів у загальному обсязі	94–95%	~22,7% (EU-27)	В Україні гірничодобувний сектор домінує у структурі відходів, у ЄС — значно менше.
Питома інтенсивність гірничих відходів (т/душу)	~10–11 т/рік	3,8–4,2 т/рік	Україна має майже удвічі вищий показник на особу.
Обсяг накопичених гірничих відходів (історичних)	~15,6–16 млрд т	~28–30 млрд т (EU-27)	Накопичення в ЄС більше у абсолютних величинах, але менше в перерахунку на одиницю площі.
Густина накопичених відходів (т/км ²)	21 700 т/км ²	6 000–7 500 т/км ²	Територіальний тиск на землю в Україні в 3–4 рази вищий.
Країни з найбільшою часткою гірничих відходів	Україна (~95%)	Фінляндія (~75–80%), Швеція (~70%), Болгарія (~55%)	Україна — абсолютний лідер Європи за часткою гірничих відходів.
Частка відходів, що утилізуються	21,7–24,5%	44–52% (EU average)	ЄС має вдвічі вищі показники повторного використання та переробки.
Частка відходів, що захоронюються / накопичуються	75–78%	23–28%	Захоронення є основним каналом поводження з відходами в Україні.
Питома інтенсивність відходів на одиницю ВВП (т/тис. \$)	~5,5–6,4	~1,4–1,7	Україна відстає від ЄС приблизно у 3–4 рази за ефективністю ресурсокористування.

Особливе місце у структурі промислових відходів займають відходи підприємств паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) України [1–4]. Вугілля — один із найдавніших видів палива, який до середини XX століття був основним джерелом енергії. Незважаючи на активне використання атомної та відновлюваної енергетики, частка вугілля у світовому виробництві електроенергії становить близько 35% (у Китаї — 70%, США — 45%, Україні — 19%). Вугільна промисловість України за рівнем техногенного навантаження перевищує інші галузі, утворюючи понад 55% усіх промислових відходів (рис.2.1).

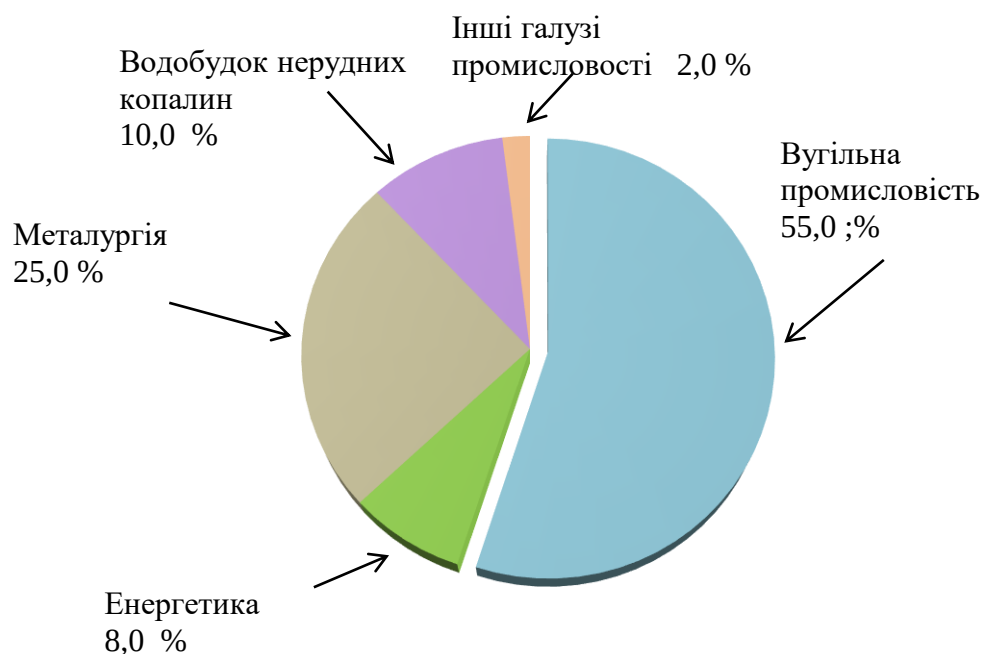


Рис. 2.1. Галузева структура утворення промислових відходів України

Стійке використання вугілля у поєднанні з тенденцією до зростання його зольності, характерною для більшості родовищ України, зумовлює зростання екологічних ризиків та підвищення навантаження на земельні ресурси. Одним із ключових наслідків є необхідність постійного розширення площ, відведених під золовідвали та інші об'єкти накопичення техногенних відходів. За виробничими

показниками, на кожен 1 тис. тонн видобутого вугілля утворюється до 800 тонн породи, а на кожен 1 тис. тонн палива, спаленого на ТЕС, — до 400 тонн золошлакових матеріалів та леткої золи.

За даними Міністерства енергетики України [12], видобуток вугілля у 2021 році становив близько 30 млн тонн, що супроводжувалося пропорційним зростанням обсягів відходів гірничодобувної та теплогенерувальної галузей [5–7]. Хоча у 2022–2025 роках обсяги видобутку скоротилися внаслідок бойових дій та доступності інфраструктури, техногенна спадщина залишається масштабною: на території України сформовано понад 1200 териконів, які займають приблизно 6,5 тис. га земель та акумулюють понад 4 млрд тонн відходів (включно з територіями Донбасу) [25].

Терикони, шламонакопичувачі та інші сховища порід формують зони підвищеного екологічного ризику. Основними загрозами є:

- самозаймання відвалів, що виникає внаслідок окиснення сполук вуглецю та сірки;
- забруднення поверхневих і підземних вод продуктами вилуговування важких металів та сульфатів;
- пилове забруднення, спричинене ерозією та дефляцією відходів;
- деградація земель, включно з порушенням ґрунтового покриву та забрудненням прилеглих агроландшафтів [2-4, 8, 9].

Сукупність цих факторів формує стійкі локальні екосистемні дисфункції, які в окремих випадках набувають незворотного характеру, що потребує реалізації комплексних програм рекультивації, моніторингу та впровадження маловідходних технологій у галузі [12-14, 16, 18-19].

Екологічна ситуація у вугільних регіонах України характеризується комплексністю та високою інтенсивністю техногенного впливу. У межах Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну зазначені процеси набувають особливої гостроти, зумовленої як специфікою геолого-технічних умов, так і

багаторічною концентрацією гірничодобувних та переробних виробництв на обмежених територіях.

Характерною ознакою сучасного стану довкілля є надмірне техногенне навантаження в межах Червоноградського гірничопромислового району. За оцінками, близько 80 % загального техногенного пресингу зосереджено у порівняно невеликому за площею фрагменті території — межиріччі Західного Бугу, Рати та Солокії, де проживає основна частина населення району. На площі близько 30 км² сконцентровано десять діючих та законсервованих вугільних шахт, найбільша у Європі вуглезбагачувальна фабрика «Червоноградська», а також низка накопичувачів та відстійників шахтних вод. Тривала експлуатація промислових об'єктів спричинила формування значних обсягів техногенних відходів, зокрема відходів вуглезбагачення та шахтних порід, які протягом десятиліть складувалися на поверхні. У результаті утворилися великі за площею шламонакопичувачі та відвали, що істотно трансформували природні ландшафти та призвели до погіршення стану поверхневих і підземних вод, погіршення санітарно-гігієнічних умов проживання населення та підвищення екологічних ризиків [24-25].

Додатковим чинником негативного впливу стала поширена у регіоні практика використання шахтних порід із териконів для господарських потреб — підсипання присадибних ділянок, вирівнювання будівельних майданчиків, облаштування доріг та спорудження дамб. Така практика сприяла вторинному розсіюванню забруднювачів, збільшенню площ техногенно порушених земель і подальшому погіршенню екологічного стану території [15].

2.2. Перспективні методи переробки відходів

Однак із позицій сучасної ресурсної політики промислові відходи дедалі частіше розглядають як техногенні родовища — багатотоннажні скупчення продуктів видобутку та перероблення мінеральної сировини, придатні для

повторного використання з народногосподарським ефектом [26-28]. За результатами пошуково-оцінювальних робіт, проведених Інститутом геологічних наук НАН України, у відходах виявлено промислові концентрації 36 кольорових, чорних, рідкісних, рідкісноземельних і дорогоцінних металів (табл. 3), а також визначено мінеральні та речовинні форми їх знаходження.

Таблиця 2.3

Вміст цінних металів у техногенних родовищах України

№ п/п	Назва техногенних відходів	Знайдені метали
1	Золи та шлаки ТЕС	Sc, Y, Ni, V, Zr, Ge, Ga, Al
2	Відходи вуглезбагачення (відвали, стічні води, пили)	Ge, PЗМ
3	Каталізатори сірчаноокислотного виробництва та нафтохімії	Mo, Ni, V
4	Червоні шлами глиноземного виробництва	Y, Ga, Zr, Sc, Y, Au, Pt
5	Відходи переробки ільменіту на пігментний діоксид титану	V, Zr, Nb, Ta, PЗМ
6	Відходи переробки піритних концентратів	Se, Te, Au
7	Відходи отримання вольфраму та молібдену електролампової промисловості	W, Mo
8	Відходи отримання феросплавів	W, Mo, Co, Nb
9	Відходи твердосплавного інструменту	W, Co, Mo, Ta, Nb, Ti
10	Відходи електротехнічної, електронної, радіотехнічної промисловості	Ga, Ge, Mo, PЗМ
11	Продукти переробки нафти	V, Se, Te, Ge
12	Продукти переробки цинкового концентрату	In, Ge, Cd, Cu, Pb
13	Хлоридні відходи виробництва титану	Sc, V, Y, Ta, Nb, Cu
14	Шлаки виробництва нікелю	Cr, Zn
15	Шлами та пили металургійних підприємств (виробництво чавуну, сталі)	Zn, Pb, Cu, PЗМ, Sn
16	Шлами збагачення залізних руд	Zn, Pb, Ag, Au, Cu, PЗМ

Продовження таблиці 2.3

№ п/п	Назва техногенних відходів	Знайдені метали
17	Шлами при переробці цирконієвої та титанової сировини	Zr, Ti, Sr, PЗМ
18	Шлами сірчаноокислотних заводів	Se, Te

На основі аналізу найперспективнішими техногенними об'єктами України визначено відходи Миколаївського глиноземного заводу, Запорізького титано-магнієвого комбінату, Нікопольського заводу феросплавів, Побузького феронікелевого комбінату, Нікітківського ртутного комбінату, Констянтинівського заводу «Укрцинк», Турбівського каолінового заводу, хіміко-металургійної фабрики Маріупольського МК ім. Ілліча, а також хвосту збагачення залізних руд Кривбасу.

До цієї групи належать і відходи підприємств ПЕК – зокрема відвали вуглезбагачення, золошлаки та летка зола ТЕС. Це пояснюється тим, що викопне вугілля багатьох родовищ світу характеризується підвищеним умістом рідкісних металів – галію, германію, скандію, ітрію, цирконію, берилію тощо, які входять до мінеральної (зольної) частини вугілля.

У процесі добування, збагачення й особливо спалювання вугілля такі елементи, як германій і галій, концентруються у золовідвалах і леткій золі до рівнів, що мають комерційний інтерес. Галій частково входить до складу глинистих і силікатних мінералів, а його вміст зростає зі збільшенням зольності вугілля. Германій, навпаки, переважно пов'язаний з органічною частиною вугілля у вигляді сорбованих форм, гуматів або зв'язаних із конденсованими структурами, тому його вміст зменшується від бурого вугілля до антрацитів [28].

Нині немає жодної галузі техніки, де б не використовувалися благородні та рідкісні метали – як лігатури, вогнетриви, легуючі добавки, елементи сонячних батарей, електронне обладнання тощо. За даними вивчення кон'юнктури

світового ринку такі рідкісні метали, як галій, германій, скандій, берилій, цирконій належать до металів із активним зростанням споживання (1-4 % на рік) [26-28]. Волатильність їхнього ринку є високою: здебільшого вони належать до металів попутного вилучення, обсяг якого залежить від виробництва основної продукції. Тому періодично виникає дефіцит, а отже – і стійке підвищення цін на деякі з них. Так, для германію та галію прогнозується збільшення попиту щорічно на 5-10 %, для берилію та цирконію – на 3-5 % на рік; скандій належить до металів із невизначеним статусом через обмеженість інформації.

Ринкова вартість чистого металевого германію останніми роками досягла 1200 дол./кг, а діоксиду германію – 1400 дол./кг, при цьому спостерігається стійка тенденція до поступового зростання цін на ці продукти [26]. Це пов'язано з тим, що германій і його сполуки (діоксид і тетрахлорид) є стратегічно важливими матеріалами, які застосовують для виготовлення оптичних приладів, що пропускають інфрачервоне випромінювання. Оптиковолоконні системи, інфрачервона оптика та напівпровідникові діоди, виготовлені з германію, широко використовуються у комп'ютерній техніці, приладах нічного бачення, навколоземних супутниках і системах наведення ракет. За експертними оцінками, у 2023-2024 рр. основними сферами світового споживання германію були, %: оптичне волокно – 30; інфрачервоні оптичні прилади – 25; каталізатори полімеризації – 25; електронні та сонячні електричні прилади – 15; інші сфери (люмінофори, металургія, хіміотерапія) – 5 [28]. Основними виробниками германію та його сполук є Китай та США (на Китай припадає понад 2/3 світового виробництва рафінованого металевого германію), а продукції на основі германію – Китай, США, Бельгія, Німеччина та Японія [23].

Подібна ситуація спостерігається й щодо галію. Цей унікальний рідкісний метал застосовують переважно в електронній промисловості і в елементах сонячних батарей як у рафінованому вигляді, так і у формі арсеніду, нітриду та оксиду. Останніми роками попит на ці сполуки істотно зріс, оскільки його

стимулює виробництво світлодіодів високої яскравості, мобільних телефонів, смартфонів та інших високошвидкісних бездротових телекомунікаційних засобів. Основними виробниками галію та його сполук є Китай, Німеччина, Росія, Казахстан, Японія та Південна Корея. При цьому 2/3 світового попиту на сполуки галію припадає на Японію, менше – на США і Китай. За експертними оцінками структура світового споживання сполук галію у 2023–2024 рр. була такою, %: виготовлення інтегральних схем – 60; виробництво оптоелектронних приладів (лазерні діоди, світлодіоди, фотодетектори та сонячні елементи) – 35; виплавка спеціальних сплавів, дослідження та інші сфери – 5 [28].

Коливання цін на галій високої чистоти є дуже значними: від 300 дол./кг у середині 1990-х років до 800-1000 дол./кг у 2001 році, із подальшим зниженням до 2004 року через перевищення пропозиції над попитом. До 2011 року ціни знову перевищили 800 дол./кг. Однак після нарощування виробничих потужностей у Китаї пропозиція стабільно перевищує попит, і ціни знижуються. У 2013-2014 рр. вони коливалися в межах 270-310 дол./кг, а наприкінці 2024 року становили 155-175 дол./кг рафінованого металевого галію [26].

Цілком очевидно, що показники за обсягами виробництва та особливо за обсягами споживання германієвої та галієвої продукції є критерієм рівня промислового розвитку країни з погляду освоєння сучасних процесів і технологій. Попри те, що Україна є розвиненою гірничодобувною державою, забезпеченою значними запасами та прогнозними ресурсами рідкісних і рідкоземельних металів, значна частина номенклатури постачальників продукції рідкісних металів до нашої країни є іноземною (Китай, Казахстан, Узбекистан). Надзвичайно багатий природний потенціал для розвитку економіки України досі не використовується повною мірою.

Оскільки галій і германій, як типові розсіяні рідкісні метали, практично не утворюють власних родовищ і приурочені до мінеральних утворень, що містять оксиди алюмінію та кремнію, а також сульфід цинку, міді, свинцю й миш'яку,

їх видобуток і виробництво переважно пов'язані з попутним вилученням під час переробки основної сировини. Так, завдяки близькості йонних радіусів Ga(III) і Al(III), галій ізоморфно заміщує алюміній у кристалічній ґратці його сполук і повсюдно його супроводжує [11]. Внаслідок цього все світове виробництво галію базується на продуктах глиноземного виробництва – розчинах, отриманих при переробці бокситів і нефелінів. Частину металу додатково вилучають із вторинної сировини – кускових і порошкоподібних відходів, що утворюються під час виробництва галієвих монокристалів і пластин.

Германій, будучи типовим розсіяним елементом, зазвичай супроводжує цинк і залізо в сульфідних мінералах, а близькість радіусів Ge(IV) і Si(IV) спричиняє його повсюдну присутність у незначних кількостях у силікатах. Тому основна частина світового виробництва германію ґрунтується на його попутному вилученні із сульфідних цинкових, свинцево-цинкових і, рідше, мідно-цинкових руд [27].

Розширення виробництва рідкісних металів і зменшення залежності від обсягів випуску так званої основної продукції потребують пошуку нетрадиційних джерел їх отримання. У більшості випадків це відходи, відвали та інші види вторинної сировини – бідні продукти, які з погляду традиційного вилучення попутних рідкісних металів є нерентабельними. Так, в вичерпаних вугіллях більшості родовищ світу виявлені практично всі елементи Періодичної системи Д. І. Менделєєва [10]. Під час вивчення закономірностей їх накопичення у вугіллях, а також поведінки при збагаченні та спалюванні, важливе значення має інформація про форми сполук мікроелементів у твердому паливі. Насамперед досліджують ті мікроелементи, які можуть або становити екологічну небезпеку, або мають реальну чи потенційну промислову цінність.

До промислово цінних елементів належать: U, Ge, Ga, Mo, V, Hg, Re, B, Li, Ag, Se, PЗЕ, Sc, Be, Au; до екологічно небезпечних – As, Hg, Be, V, Zn, Pb, Mo, U, F, Cl, Ni, Cr, Sb, B, Cu, Th, ^{40}K , Ra, U. Слід зазначити, що саме спостереження

за накопиченням і розподілом германію на різних етапах формування та освоєння вугільних родовищ започаткувало новий науковий напрям – геохімію викопних вугіллів.

На основі знань щодо леткості нижчих оксидів і сульфїду германію норвезький учений В. Гольдшмїдт ще у 1920-х роках передбачив можливість концентрації цих сполук у летких золах виносу, що утворюються під час спалювання вугілля. Згодом це припущення було повністю підтверджене, що дало змогу розробити й упровадити промислові технології отримання германію із зол виносу та золошлаків.

У СРСР виробництво тетрахлориду й діоксиду германію було зосереджене в Україні – на Сєверодонецькому хїміко-металургійному заводі та Запорізькому титаномангнієвому комбінаті.

Сировинною базою слугували германієносні аргїліти Новіковського родовища (о. Сахалін), золи українських енергетичних германієносних вугіллів, а також надсмольні води коксохімічних підприємств. У 1990-х роках виробництво було припинене, і сьогодні в Україні немає чинних германієвих виробництв, попри наявність сировинної бази.

Наведені в таблиці дані свідчать про наявність у відходах ПЕК України деяких металів, зокрема рідкісних і рідкоземельних, у промислових концентраціях, що дає підстави відносити такі відходи до так званих «техногенних родовищ» – нетрадиційних сировинних джерел цінних компонентів.

У таблиці 2.4 наведено узагальнені дані щодо вмісту кольорових і рідкісних металів у відвальних продуктах, що утворюються внаслідок діяльності видобувних і переробних підприємств паливно-енергетичного комплексу України: у відвалах вуглезбагачення ЦЗФ «Червоноградська» ЛВВБ, золошлаках і золі виносу різних українських ТЕС, які працюють на вугіллі шахт Львівсько-Волинського басейну [20].

Таблиця 2.4

Хімічний склад породних відвалів ЦЗФ «Червоноградська» і золи-виносу ДТЕК

Ладизінська ТЕС відносно основних складових

Елемент	Клас небезпеки	ГДК для ґрунту, мг/кг	Промислові концентрації, мг/кг	Виявлені концентрації, мг/кг	
				Відвал ЦЗФ	Зола-винос ТЕС
1	2	3	4	5	6
Мідь	2	3,0	45,0-60,0	62,18	68,18
Цинк	1	23,0	65,0-70,0	112,52	327,33
Марганець	3	$1,5 \cdot 10^3$	$850,0 - 10^3$	317,72	572,60
Свинець	1	30,0	18,0-22,0	42,20	108,74
Нікель	2	4,0	80,0-120,0	134,20	177,00
Кадмій	1	0,5	45,0-55,0	2,82	5,31
Залізо	-	$3,7 \cdot 10^3$	$(1,5-2,0) \cdot 10^3$	$44,57 \cdot 10^3$	$59,31 \cdot 10^3$
Олово	2	4,5	90,0-120,0	351,9	206,9
Хром	2	6,0	190,0-210,0	99,1	218,1
Ванадій	3	150,0	140,0 -160,0	150,0	даних немає
Кобальт	2	12,0	37,0-42,0	116,1	304,9
Алюміній	-	даних немає	$(2,5-5,0) \cdot 10^3$	$13,9 \cdot 10^3$	$38,9 \cdot 10^3$
Сірка	-	160,0	-	$11,7 \cdot 10^3$	$5,7 \cdot 10^3$
Кремній	-	даних немає	даних немає	$159 \cdot 10^3$	$121 \cdot 10^3$
Галій	-	даних немає	10,0-15,0	12,1	10,0
Германій	-	даних немає	5,0-7,0	26,00	28,00
Цирконій	-	даних немає	160,0-220,0	173,0	237,0
Ніобій	-	даних немає	19,0-22,0	14,0	19,0
Лантан	-	даних немає	25,0-29,0	48,0	42,0
Церій	-	даних немає	25,0	69,0	74,0
Рубідій	-	даних немає	90,0	141,0	116,0
Стронцій	3	даних немає	80,0	211,0	656,0
Барій	3	даних немає	250,0-400,0	519,0	634,0
Титан	-	даних немає	$4,0 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^3$	$41,6 \cdot 10^3$
Кальцій	-	даних немає	даних немає	$17,2 \cdot 10^3$	$1,98 \cdot 10^3$

Збагачення золошлаків і золі виносу галієм та германієм зумовлене хімічними властивостями цих елементів: у процесі спалювання палива в котлоагрегатах метали, що входять до мінеральної (зольної) і органічної складових вугілля, сублімують, а під час охолодження димових газів конденсуються на поверхні частинок золі виносу у вигляді Ga_2O_3 і GeO_2 . Порівняно з вихідним вугіллям зола виносу збагачується цінними металами у 8-10 разів – до концентрацій понад 200 г/т. У золошлаках і відвальних породах після збагачення вугілля концентрація цих металів нижча, однак усе ще є порівнянною з їхнім вмістом у традиційних сировинних джерелах, з яких їх зазвичай вилучають. Це може відігравати суттєву роль при виборі способу переробки конкретного виду техногенної сировини та оцінці можливості її комплексного використання [27-28].

Технології отримання концентратів рідкісних металів із традиційної сировини (руд) добре відпрацьовані. Основний принцип – гідро- та пірометалургічне розкриття вихідного продукту.

Особливості:

- Використовуються агресивні хімічні реагенти.
- Потрібні спеціальні умови та обладнання.

Проблема з техногенною сировиною (золошлаки, зола виносу):

- Багатокомпонентність.
- Високий вміст макроприміс і баластних речовин.
- Вилучення германію та галію ускладнене відомими хімічними методами.
- Потребується більша витрата реагентів, які часто дорогі та екологічно небезпечні.

Концентрація цінних металів:

- Субстрати містять низькі концентрації германію та галію.

- Часто метали входять до кристалічних ґраток кремнезему, силікатів та алюмосилікатів.

На початковому етапі слід проводити попереднє термічне збагачення, щоб:

- Концентрувати германій та галій.
- Відокремити їх від основної частини кремнію та інших небажаних домішок.

Метод вторинного пірозбагачення:

- Високотемпературне плавлення (понад 1000 °C) у відновлювальній атмосфері.
- Використовуються печі із системами уловлювання випарів (рукавні або електрофільтри).
- До шихти додають:
 - Вугілля – відновник.
 - Соду та вапняк – флюс і для зниження температури плавлення шлаку.
 - Оксид міді (іноді) – колектор цінних металів.

Традиційні методи достатньо ефективні для концентрованої сировини, але для техногенних відходів із низьким вмістом рідкісних металів вони стають економічно та екологічно затратними. Тому термічне збагачення та пірозбагачення є важливими етапами підготовки матеріалу до подальшого вилучення.

Розробка біотехнологічних методів переробки мінеральної сировини природного та техногенного походження за участю мікроорганізмів різних фізіологічних груп є одним із перспективних та інтенсивно розвиваючихся напрямів [30]. На сьогодні вже сформувалася нова наукова дисципліна – біогеотехнологія металів, в рамках якої як технологічний прийом розвивається окремий напрям – бактеріальне вилуговування. Це процес вилучення металів із

різної сировини під дією мікроорганізмів або їхніх метаболітів. Розвиток цього напряму став можливим завдяки накопиченим знанням геологічної мікробіології, основою якої є той факт, що мікроорганізми активно беруть участь у геологічних процесах формування та трансформації корисних копалин [30-33].

Багато металів комерційного інтересу, таких як мідь, нікель, цинк, золото, молібден та ін., зустрічаються у природі у вигляді сульфідів, які здатні переходити в розчинні сульфати під дією окисних агентів у земній корі. Біологічні властивості різних груп мікроорганізмів та особливості їх життєдіяльності у природних родовищах значно впливають на процеси формування, а також сприяють деструкції мінералів, аж до міграції та розсіювання окремих елементів через низку окисно-відновних реакцій, зокрема за участю сірковмісних сполук у сульфідних рудах. Існують численні докази участі мікроорганізмів як у процесах формування, так і у процесах руйнування геогенних субстратів (природних руд і мінералів, самородної сірки, нафти, торфу, вугілля тощо), що супроводжується вилученням з них корисних компонентів [31]. Про життєдіяльність та біохімічну активність мікроорганізмів у субстратах техногенного походження, зокрема пов'язаних з видобутком і переробкою вугілля, відомо поки що небагато.

Екологія мікроорганізмів, описаних і використаних у процесах бактеріального вилуговування металів, достатньо широка: вони виявлені як у природних умовах (поблизу сірчаних геотермальних джерел, у природних рудах і шахтних водах), так і в промислових (у хвостосховищах, ілонакопичувачах, відвальних териконах підприємств видобувної та переробної промисловості).

Гетерогенні умови різних екологічних ніш із перепадами температур і кислотності, специфічним фізико-хімічним і мінералогічним складом формують і підтримують широке різноманіття аборигенної мікробіоти.

Виявлене біорізноманіття мікробного населення у природних і техногенних екосистемах представлене аеробними та анаеробними мікроорганізмами, серед яких присутні:

- автотрофні (здатні фіксувати CO_2);
- гетеротрофні (використовують органічний вуглець);
- хемолітофільні (окислюють залізо і сірку);
- сульфатредуючі бактерії та археї [32].

Професор Гельмут Трибуц (Німеччина) підсумував існування трьох основних на сьогодні «стратегій» бактеріального вилуговування сульфідних мінералів:

1. Контактне, коли мікроорганізми прикріплюються до поверхні мінералу, сприяючи його електрохімічному розчиненню за допомогою Fe^{3+} , що міститься у витоплюваних продуктах;
2. Непряме, коли мікроорганізми не прикріплюються до поверхні мінералу, і їхня дія обмежується регенерацією окисника Fe^{3+} ;
3. Кооперативне, коли спочатку окислення відбувається за участю мікроорганізмів, прикріплених до мінералу, а потім завдяки Fe^{3+} , регенованому мікроорганізмами у розчині.

Незалежно від механізму, у процесі бактеріально-хімічного вилуговування відбувається окислення сульфідів, що супроводжується вилученням металів у розчин.

Історія розвитку бактеріального вилуговування почалася ще в 1888 році з відкриття С. Н. Виноградським явища хемосинтезу. Перші роботи з цілеспрямованого використання цього методу для вилучення металів розпочалися в 1947 році після виділення Хінкелем і Кольмером із кислотних шахтних вод Західної Вірджинії мікроорганізмів, здатних окислювати Fe^{2+} до Fe^{3+} , віднесених до *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

На сьогодні процесами бактеріального окислення та вилуговування займаються понад 100 наукових організацій і компаній у 25 країнах світу.

Провідні країни у розвитку біогеотехнології металів: Німеччина, США, Франція, Китай, Канада.

Промислова реалізація включає десятки промислових та дослідно-промислових установок бактеріального вилуговування у ПАР, Австралії, Бразилії, США, Канаді, Замбії, Гані, Росії та інших країнах.

Основні технологічні процеси

1. Біовилуговування – перетворення нерозчинних сульфідів у розчинні сульфати або створення умов для деструкції мінералу з переходом металу в розчин. Приклад: перетворення мікроорганізмами нерозчинних сполук міді (ковеллін CuS , халькозин Cu_2S) у розчинні сульфати, що дозволяє практично повністю вилучити мідь у розчин.
2. Біоокислення – вилучення заліза, миш'яку, сірки та інших баластних компонентів із золотоносних мінералів (наприклад, арсенопіриту FeAsS), що концентрує золото у мінералі для подальшого легшого вилучення традиційними методами (ціануванням).

Обидва процеси є окисними, але: у першому випадку цінний метал вилучається з мінералу (біовилуговування); у другому – метал концентрується в руді (біоокислення). В промисловій біотехнології обидва процеси відносять до біовилуговування.

Переваги біотехнологічних методів

- Можливість використання для бідних руд, руд складного складу, руд із тонкою вкрапленістю рідкісних металів;
- Застосування до хвостів і відвалів гірничо-збагачувальних підприємств;
- Простота, низька вартість, економія енергії та ресурсів;
- Висока ефективність та відносна селективність;
- Екологічна безпека.

Методи проведення бактеріального вилуговування

Основні методи: чанове (періодичне або неперервне), купове та підземне вилуговування.

- Чанове біовилуговування (перколяційне / пачукове) – найбільш контрольований процес, забезпечує високу швидкість та ступінь вилучення металів. Постійний контроль параметрів процесу дозволяє підтримувати бактерії на активному рівні та контролювати домінування найбільш адаптованих штамів.

Схема процесу чанового вилуговування:

1. Пульпа з оброблюваного субстрату та поживного розчину з біомасою бактерій (Т:Ж = 1:(5-15)) подається у блок послідовно з'єднаних біореакторів (перколяторів / пачуків).
2. У реакторах відбувається бактеріальне окислення мінералів.
3. З останнього реактора пульпа надходить у ємності для розділення рідкої та твердої фаз.
4. Розчини після вилучення металів разом із бактеріями повертаються у контактний чан для повторного приготування пульпи.

Промислові приклади

- Відходи руди уранового родовища Форстау, Австрія (0,03-0,15% U);
- Низькосортна уранова руда шахти Турамдих, Індія (0,03% U_3O_8);
- Бідна уранова руда шахти Сагханд, Іран;
- Руда Інгульської шахти, Україна (10^{-3} - 10^{-10} % U).

Ступінь вилучення урану у процесах чанового бактеріального вилуговування сягає до 97,7%. Найширше чанове біоокислення використовується для видалення заліза та миш'яку із золотоносних руд, завдяки мінімальному екологічному впливу та контролю процесу.



Рис. 2.2. Чанова установка для обробки золотоносних мінералів рудника Fairview (Південна Африка)



Рис. 2.3. Кучне бактеріальне вилуговування міді з некондиційних руд мідної копальні Bingham Canyon (штат Юта, США)

В Україні є всі необхідні передумови для розвитку та впровадження бактеріального вилуговування, як мінімум, урану та золота, за найбільш відпрацьованими і поширеними на сьогодні у світовій практиці технологіями, описаними вище. Це пов'язано з наявністю потужної сировинної бази урану (за ресурсами і запасами Україна входить до першої десятки країн світу та займає провідне місце в Європі), а також високим золоторудним потенціалом, який до цього часу не оцінювався.

Незважаючи на перспективність біотехнологічних методів, є лише окремі відомості про розробки українських вчених у цьому напрямі.

Так, у КВУкрДГРІ (Кримське відділення Українського державного геологорозвідувального інституту, м. Сімферополь) у 2005-2010 рр. була розроблена комплексна біотехнологія переробки різних типів золотовмісних руд, продуктів їх збагачення та відходів, яка включала:

- Біовилуговування золота новим біореагентом ЮГ-2 (склад невідомий) – замітник ціанідів;
- Біогравітаційне збагачення та біофлотацію дрібного та тонковкрапленого золота;
- Біоокислення високомиш'яковистих сульфідних руд і концентратів.

Маючи широкий діапазон вмісту золота у досліджуваній сировині (від 1,3 до 420 г/т), біореагент вилучав його у розчин на 68-96%. При біоокисленні та подальшому виварюванні із високомиш'яковистого сульфідного концентрату (27% As) ступінь вилучення золота досягала 93,2% проти 54,0% при прямому ціануванні. Було проведено лабораторні, пілотні та укрупнені випробування розробленої технології на золотовмісних рудах родовищ України, Китаю, та Греції.

Незважаючи на те, що процеси видобутку та переробки геогенного та техногенного сировинного матеріалу за участю мікроорганізмів уже зайняли міцні позиції у світовій практиці, вони сьогодні здатні конкурувати з

традиційними технологіями лише в галузях кольорової металургії, пов'язаних з видобутком і переробкою сульфідного (мідного, уранового, цинкового, нікелевого, золотовмісного) сировинного матеріалу.

У літературі відсутні дані про розробки біотехнологічних підходів до переробки перспективного техногенного матеріалу, зокрема для вилучення рідкісних металів – відходів видобутку, збагачення та спалювання копалин вугілля. Що стосується можливості цілеспрямованого або супутнього отримання рідкісних металів бактеріальним вилуговуванням, дані дуже обмежені і зводяться до відомої роботи професора Agrad E. Torma, в якій наведені дані про вилуговування за допомогою *Thiobacillus ferrooxidans* германію та галію з побічних продуктів переробки алюмінію, цинку та міді, зокрема з сульфідних мінералів – сфалериту та халькопіриту, причому з досить низькими показниками вилучення рідкісних металів (до 20%).

Співробітниками Біотехнологічного науково-навчального центру ОНУ імені І. І. Мечникова проведено комплексне хіміко-біологічне дослідження техногенної сировини, що утворюється в результаті діяльності підприємств ТЕК України:

- відвали Центральної збагачувальної фабрики (ЦЗФ) Львівсько-Волинського вугільного басейну (ЛВВБ);
- зола виносу та золошлак від спалювання вугілля ЛВВБ на Ладизинській та Добротвірській ТЕС відповідно [30-32].

Ця сировина утворюється як відвальний продукт основного виробництва і зберігається на території промислових комплексів. Під впливом певних виробничих умов та природних факторів у процесі формування і складування техногенних екосистем виникає особлива за своїм складом аборигенна мікробна спільнота.

**а****б****в**

Рис. 2.4. Породний відвал ЦЗФ «Червоноградська» Львівсько-Волинського вугільного басейну:

а – загальний вигляд відвалу та іловідстійника;

б – чорний відвал;

в – «лежаний» червоний відвал.

Під час зберігання субстратів під дією зовнішніх факторів відбуваються зміни, які впливають на структуру та склад мікробіоценозу і на здатність сформованих рівноважних систем до деструкції. Для виявлення цих змін досліджували проби субстратів різного терміну зберігання. У результаті було узагальнено дані аналізу понад 60 проб, відібраних у 2009–2018 рр. (з квітня по листопад) на схилах відвалів із поверхневого шару до глибини 50 ± 5 см. Для прогнозування розвитку аборигенних асоціацій у субстратах залежно від терміну їх накопичення проводили мікробіологічні посіви на поживні середовища, селективні для ацидофільних хемолітофільних та гетеротрофних мікроорганізмів, оскільки саме вони є типовими та поширеними представниками мікробіоценозів геогенного та техногенного походження.

Мікроорганізми взагалі не виявлялися або спільноти були дуже бідними у свіжовідсипаних субстратах, особливо в термічно оброблених золошлаках і золі виносу. Під час їх зберігання відбувається формування асоціацій. У відвалах з кислим середовищем створюються сприятливі умови для активного росту як хемолітофільних, так і гетеротрофних мікроорганізмів.

У золошлаку та золі виносу з нейтральним або слабо лужним середовищем формування гетеротрофної частини власної асоціації відбувається швидше, ніж хемолітофільної, і кількісно виражене сильніше, як у порівнянні з відвалами, так і щодо власної хемолітофільної частини.

Загальною тенденцією є те, що при зберіганні досліджених техногенних субстратів понад три роки у них формується стійка численна рівноважна аборигенна спільнота, з якої можливо виділення активних штамів для біотехнологічних розробок.

Щодо реалізації біотехнологій, орієнтація на «лежалі» субстрати є доцільною не лише через наявність сформованої власної мікробної асоціації, а й тому, що саме вони накопичені у величезних кількостях і потребують першочергового залучення до переробки.

Якщо золошлак і зола виносу частково відправляються на утилізацію для виробництва будівельних матеріалів та відсипки доріг, то відвали вугільного збагачення зберігаються та накопичуються десятками років.

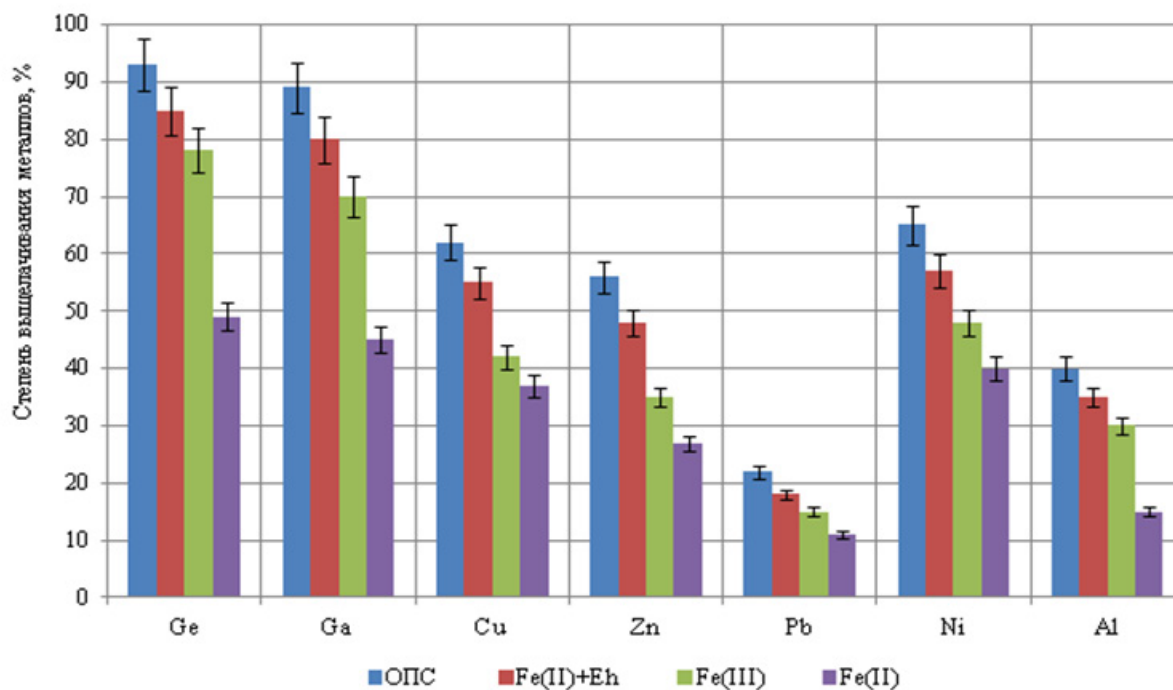


Рис. 2.5. Ступінь вилучення металів з червоних відвалів збагачення вугілля мезофільною асоціацією АХБ за різних умов вилуговування

Перевагою проведення вилуговування з ОПС, до складу якої як джерело енергії входить тиосульфат, є відсутність внесених іонів заліза — небажаної домішки при подальшому сорбційному вилученні германію з отриманих колективних розчинів на стадії отримання германієвого концентрату.

Дослідження відпрацьованих за розробленою біотехнологією відвалів підтвердило значне зниження концентрацій важких металів, що робить їх екологічно безпечними та перспективними для подальшого використання.

Слід зазначити, що в процесі біовилуговування досліджуваних субстратів за рахунок окислювальної діяльності мікроорганізмів аборигенної асоціації

відбувається руйнування кристалічної структури відвальних продуктів до дрібнодисперсного стану (рис 7), що робить оброблені субстрати зручними для подальшого використання як насипного матеріалу, для рекультивації земель тощо без попереднього подрібнення.

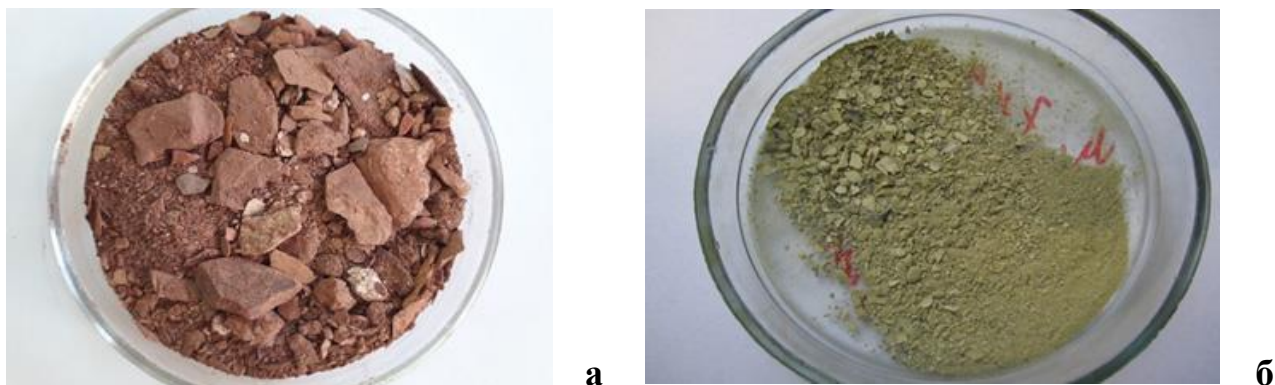


Рис. 2.6. Зовнішній вигляд червоного відвалу вуглезбагачення: вихідного (а), після біовилужування при оптимальних параметрах (б)

Проведені в укрупненому масштабі на експериментальному стенді випробування розробленої біотехнології переробки відвалів вугільного збагачення ЦОФ «Червоноградська» показали її високу ефективність та екологічну безпеку, а також продемонстрували реальну можливість застосування сучасних мікробних технологій для переробки не лише природних руд і мінералів, а й промислових відходів діяльності підприємств ТЕК України.

2.3. Економічні стимули та пріоритети здійснення «зеленої модернізації» щодо управління відходами

Промисловість традиційно залишається одним із найбільш значущих антропогенних чинників впливу на навколишнє природне середовище, а тому екологізація економічної діяльності в цілому набуває статусу нагальної та пріоритетної потреби. Під екологізацією розуміють процес поетапного й

системного впровадження технологічних, управлінських та організаційних рішень, спрямованих на підвищення ефективності використання природних ресурсів, зниження рівня забруднення атмосферного повітря, земельних та водних ресурсів, а також на формування стійкої екологічної рівноваги.

Проблема екологізації промислового виробництва охоплює широкий комплекс економічних, соціальних та техніко-технологічних аспектів функціонування господарського механізму. Вона безпосередньо пов'язана з характером використання виробничого потенціалу, питаннями територіальної раціональності розміщення промислових об'єктів та забезпеченням екологічної безпеки відповідних територій. Екологізація сучасного виробництва передбачає оптимізацію виробничих процесів, мінімізацію втрат сировини, упровадження мало- та безвідходних технологій, які забезпечують зниження кількості утворюваних та неутилізованих відходів.

З цією метою широко застосовуються технології комплексного перероблення сировини, що дозволяє максимально використовувати її складові. Важливе значення має оптимізація технологічних параметрів процесів, їх автоматизація, а також упровадження високоефективних систем очищення газових та рідких викидів. Зокрема, очищення стічних вод із подальшим їх використанням у замкнених циклах водообігу забезпечує суттєве зменшення техногенного навантаження на водні ресурси. Значна увага приділяється утилізації відходів виробництва та розробленню заходів зі збереження паливно-енергетичних та інших природних ресурсів.

Комплексна реалізація таких заходів сприяє отриманню високоякісної та екологічно безпечної продукції за умов мінімальних екологічних втрат, а також збереженню стійкої динамічної рівноваги в природному середовищі. Водночас технологічна відсталість низки галузей української промисловості зумовлює низьку продуктивність праці, високу ресурсо- та енергомісткість продукції. Це актуалізує потребу у створенні власних сучасних технологій, а також у швидкій

адаптації та впровадженні передових рішень, що застосовуються в промислово розвинених країнах. Особливого значення набуває розвиток інноваційної діяльності як основи технологічної модернізації.

Ефективна організація техногенного ресурсного циклу на підприємствах має передбачати: максимізацію виходу цільового продукту за мінімальних витрат сировини, енергії та допоміжних матеріалів; виробництво екологічно безпечної продукції; мінімізацію утворення неутилізовуваних відходів; зменшення обсягів викидів і скидів забруднювальних речовин. Реалізація цих завдань вимагає створення сучасного фінансово-економічного механізму екологізації, здатного забезпечити накопичення, раціональний розподіл та цільове використання фінансових ресурсів для розв'язання екологічних проблем.

Одним із ключових напрямів екологізації виробництва є перехід до замкнених технологічних циклів, що передбачає багаторазове використання ресурсів та відходів. Повторне використання відходів може здійснюватися у трьох основних формах:

1. повернення відходів у первинний виробничий процес;
2. застосування їх у інших технологічних операціях;
3. перетворення на сировину для інших галузей.

Ці підходи узгоджуються з принципами циркулярної економіки, яка базується на мінімізації обсягів використання первинних ресурсів та максимально можливого використанні вторинних матеріальних потоків [34].

Висновки до розділу 2

На підставі проведеного аналізу можна зробити такі ключові висновки щодо техногенних відходів як джерела ресурсних та екологічних викликів:

Масштабне екологічне навантаження: Промисловість України, зокрема металургійна, гірничодобувна, хімічна та енергетична галузі, генерує колосальні

обсяги відходів – понад 450 млн тонн щорічно, що становить 94-95% від загальної їх кількості. Накопичені відходи (близько 16 млрд тонн) створюють один з найвищих у Європі рівнів техногенного навантаження на одиницю площі.

Системні проблеми управління: Для України характерні низький рівень утилізації відходів (21,7-24,5%), технологічна архаїчність, відсутність ефективних економічних стимулів для "зеленої модернізації" та недостатня інфраструктура переробки. Це призводить до того, що 75-78% відходів підлягає захороненню, формуючи довгострокові екологічні ризики.

Ресурсний потенціал техногенних відходів: Відходи промисловості є значним потенційним джерелом цінних металів. У техногенних родовищах України виявлено промислові концентрації 36 кольорових, рідкісних, рідкоземельних і дорогоцінних металів, зокрема Ga, Ge, Sc, Y, PЗМ у відходах вугільної енергетики та металургії.

Перспективні технології переробки: Найбільш перспективними є:

- Термічні методи (пірозбагачення) для концентрації рідкісних металів з золошлаків.
- Біотехнологічні методи (бактеріальне вилуговування), які є екологічно безпечними та економічно ефективними для переробки бідних і складних за складом відходів. Розроблена вітчизняна біотехнологія переробки вугільних відвалів довела свою ефективність на практиці.

Економічні стимули "зеленої модернізації": Необхідний перехід до циркулярної економіки шляхом:

- Впровадження екологічного оподаткування (carbon tax, landfill tax).
- Запровадження принципів розширеної відповідальності виробника (EPR).
- Стимулювання інноваційної діяльності та розвитку замкнених технологічних циклів.

Таким чином, техногенні відходи в Україні є не лише серйозною екологічною проблемою, але й значним ресурсним потенціалом. Подолання

існуючих викликів вимагає комплексного підходу, що поєднує впровадження сучасних технологій переробки, створення ефективних економічних стимулів та посилення інституційного забезпечення управління відходами в контексті євроінтеграційних вимог.

РОЗДІЛ 3. ПРІОРИТЕТИ ДЕРЖАВНОЇ ПОЛІТИКИ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРЕРОБКИ ТЕХНОГЕННИХ ВІДХОДІВ ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

3.1. Інституційне забезпечення переробки техногенних відходів вугільної промисловості

Відсутність єдиної нормативної методики для визначення ступеня потенційної небезпеки відходів, функціональна роздробленість повноважень між державними органами, дублювання контролюючих функцій та низький рівень координації – усе це стримує ефективну політику управління накопиченням відходів. Така роздрібненість ускладнює оперативне реагування на екологічні аварії, інвестиційну координацію заходів щодо рекультивації та створення національної бази вторинних ресурсів.

В Україні й досі не створена цілісна система економічних стимулів, здатних забезпечити реальну трансформацію промислового сектора в напрямі впровадження екологічно безпечних та ресурсоефективних технологій. Через недостатню розвиненість інструментів «зеленої» економіки (екологічні податкові моделі, механізми розширеної відповідальності виробника, система торгівлі квотами, спеціальні фонди інноваційної переробки) рівень упровадження інноваційних, ресурсозберігаючих і природоохоронних технологій залишається вкрай низьким. Це стосується як технологічного переоснащення виробництв, так і модернізації інфраструктури поводження з відходами – від переробки до утилізації й екологічно безпечного знищення.

Необхідність формування сучасної політики переробки промислових відходів і вирішення проблем розвитку шахтарських територій є одним з актуальних питань, що потребує нагального вирішення. У зв'язку з реалізацією євроінтеграційної стратегії трансформація політики територіального розвитку

має відбуватися на базі імплементації основних принципів поводження з відходами, зокрема Директиви 2006/21/ЄС про управління відходами добувної промисловості, в національне законодавство України, що прискорить реалізацію підписаної з ЄС Угоди про асоціацію. Основною метою Директиви 2006/21/ЄС є максимально можливе попередження та мінімізація будь-якого негативного впливу на довкілля і ризиків для здоров'я людини, що можуть виникати в результаті управління відходами добувної промисловості. Досягнення цілей Директиви в Україні має здійснюватися за таким напрямками: ухвалення національного законодавства та визначення уповноваженого органу (органів); встановлення системи, яка забезпечить створення / розроблення операторами (суб'єктами господарювання) планів управління відходами (визначення та класифікація місць/об'єктів розміщення відходів добувної промисловості; характеристика відходів); встановлення дозвільної системи, фінансових гарантій та системи контролю; встановлення процедур управління та моніторингу видобувних пустот; встановлення процедур закриття та подальшого нагляду за виробничими майданчиками відходів добувної діяльності; створення реєстру закритих майданчиків відходів добувної діяльності. Досягнення цілей Директиви разом з ефективною політикою щодо ревіталізації браунфілдів може сприяти вирішенню проблем шахтарських регіонів [35].

3.2. Особливості управління відходами відповідно до норм

Аналіз сучасних тенденцій у сфері утворення та використання відходів в Україні засвідчує, що управління відходами залишається однією з ключових екологічних проблем, яка безпосередньо впливає на стан природного середовища, структурні параметри економічного розвитку та рівень антропогенної трансформації ландшафтів. Формування екологічно безпечної, ресурсно орієнтованої та економічно ефективної системи поводження з

відходами є стратегічним пріоритетом державної екологічної політики та одним із базових індикаторів переходу до моделі сталого розвитку.

Протягом останніх років в Україні, домінуючою технологічною та організаційною практикою залишалося видалення відходів, тобто їх депонування на полігони, шламонакопичувачі, терикони та інші накопичувальні об'єкти. Така практика відображає інерційний характер функціонування системи управління відходами, що не інтегрує сучасні принципи циркулярної економіки та не забезпечує достатнього рівня перероблення, утилізації або екологічно безпечного знешкодження.

Збереження значних обсягів щорічного утворення відходів, водночас із обмеженими темпами їхнього використання чи повторної переробки, зумовлює прогресуюче накопичення техногенних масивів як у промисловому, так і в побутовому секторі. Станом на останні роки частка використаних відходів не перевищує 30 %, що є істотно нижчим за потенційні можливості національного економічного комплексу та суперечить міжнародним орієнтирам ЄС, де мінімальні цільові показники перероблення сягають 50–65 % залежно від категорій матеріалів.

Особливої уваги потребує структура утворення відходів: близько 98 % загальних обсягів припадає на результати економічної діяльності підприємств та організацій, тоді як частка відходів домогосподарств становить менш як 2 %. Такий дисбаланс відображає глибоку технологічну залежність української економіки від матеріалоємних та ресурсоінтенсивних галузей (металургія, гірничодобувна промисловість, енергетика, хімічний комплекс), що продукують значні кількості техногенно-мінеральних мас IV класу небезпеки.

У структурі утворених відходів домінують мало небезпечні мінеральні відходи IV класу, які хоча й характеризуються відносно низьким потенціалом токсичності, проте створюють масштабні проблеми територіального характеру: трансформацію рельєфу, деградацію земель, формування техногенних

ландшафтів та збільшення навантаження на інженерно-геологічні умови територій.

Таким чином, недостатня ефективність заходів, спрямованих на запобігання утворенню відходів, їх перероблення, утилізацію чи екологічно безпечне видалення, спричиняє поглиблення екологічної кризи та виступає системним обмеженням для економічного зростання. Невикористаний ресурсний потенціал відходів (особливо промислових техногенних утворень, що містять метали, мінеральні та органічні компоненти) призводить до втрати значної частки вторинних ресурсів, знижуючи можливості для інноваційно-технологічної модернізації та зменшення імпортозалежності.

У сукупності зазначені чинники підкреслюють необхідність структурної модернізації національної системи управління відходами, її наближення до європейських стандартів та впровадження політик, що базуються на принципах ресурсної ефективності, Life Cycle Assessment та циркулярного управління матеріальними потоками [36].

Накопичення промислових відходів в Україні виступає одним із ключових чинників деградації довкілля, який має прямі та опосередковані наслідки для здоров'я населення, матеріально-технічної інфраструктури та економічної стабільності регіонів. Інтенсифікація накопичення зумовлена як масштабами матеріалоємного виробництва (особливо в гірничо-видобувному, металургійному, хімічному та теплоенергетичному секторах), так і недосконалістю системи поводження з відходами, що проявляється у високій частці видалення/захоронення та низькій частці перероблення і рекуперації.

За даними державної статистики, на теперішній час. у спеціально відведених місцях та на територіях підприємств накопичилось понад 20 млрд т відходів. Близько 85 % цих мас утворюють продукти первинного гірничо-збагачувального циклу (розкривні та шахтні породи, шлами, хвости збагачення), які зосереджені в гірничо-видобувних регіонах (Донбас, Кривбас, Львівсько-

Волинський басейн та ін.). Висока територіальна концентрація формує локальні техногенні ландшафти (терикони, відвали, шламонакопичувачі), що мають значну площу й довготривалу інерцію впливу.

Рівень небезпеки, який створюють накопичувачі відходів, обумовлений не лише об'ємом, а й фізико-хімічними властивостями відходів та продуктами їх трансформації (корозійні стоки, фільтрати, пиловидні аерозолі). Особливо небезпечними є процеси дифузії токсичних компонентів у ґрунтові та поверхневі води, перехід важких металів у біологічно доступні форми, а також утворення летких та токсичних сполук при самозайманні або під час деградації. За відсутності сучасних нормативів, які однозначно класифікують ступінь потенційної небезпеки відходів, ефективне пріоритизаційне управління ризиками ускладнене [15].

При порушенні умов експлуатації накопичувачів (ерозія, інтенсивне пиловиділення, прориви дамб, фільтрація шламових вод) відбувається забруднення компонентів довкілля: ґрунту, ґрунтових і поверхневих вод, повітря. Практичні дослідження свідчать, що зона наднормативного впливу може виходити за межі формально встановлених 300-метрових санітарно-захисних зон (СЗЗ) – ці межі є мінімально допустимими і не гарантують відсутності техногенного впливу в разі аварій або тривалого пилоперенесення.

Річний техногенний тиск (сума накопичених мас на одиницю площі) в Україні у 2021 р. оцінювався орієнтовно в 21,7 тис. т/км², при чому регіональні показники значно варіюють: Дніпропетровська – ~318,3 тис. т/км², Донецька – ~40,2 тис. т/км², Кіровоградська – ~14,0 тис. т/км², Львівська – ~10,5 тис. т/км². Ці величини ілюструють нерівномірне розподілення техногенного навантаження й вказують на регіони підвищеної екологічної вразливості.

Фактичні об'єми накопичених відходів у багатьох регіонах перевищують офіційні показники, оскільки збанкрутілі або непрацюючі підприємства, які раніше створили значні масиви відходів, часто не відображені у статистичних

спостереженнях. Відповідно, наявні бази даних недооцінюють екологічні ризики і ускладнюють пріоритизацію заходів з рекультивації [3, 7, 25].

Накопичення відходів стало одним із ключових антропогенних чинників деградації навколишнього природного середовища та супроводжується комплексним впливом на всі його компоненти:

- атмосферне повітря (через пилові викиди, вторинні аерозолі, продукти окиснення),
- поверхневі та підземні води (фільтрати, інфільтрація токсичних речовин),
- ґрунти та ландшафти (накопичення важких металів, формування техногенних геокомплексів),
- біоту (порушення екосистемних зв'язків, біоаккумуляція токсикантів).
- За недостатності технологій перероблення та відсутності економічних механізмів запобігання утворенню відходів (waste prevention), зростання їхніх накопичень зберігає тенденцію до прискорення.

У такій ситуації саме обмеження обсягів утворення відходів, а також розширення масштабів їх вторинного використання, утилізації, перероблення й екологічно безпечного видалення повинні стати стратегічним пріоритетом державної екологічної політики. Ці заходи повністю відповідають Європейській ієрархії поводження з відходами (Prevention → Preparation for Re-use → Recycling → Recovery → Disposal), яка лежить в основі директив ЄС і сучасних моделей циркулярної економіки [34].

3.3. Геоекономічна оцінка ризиків екзогенних геологічних процесів

Екзогенні геологічні процеси (ЕГП) становлять системну загрозу економічній безпеці України. Їхній вплив на соціально-економічний розвиток регіонів потребує глибокого геоекономічного аналізу з урахуванням сучасних викликів, зокрема воєнного стану та кліматичних змін [15, 24].

1. Деталізація прямих економічних збитків

Руйнування інфраструктури:

- Транспортні системи - пошкодження автомобільних та залізничних магістралей, мостів, тунелів.
- Енергетична інфраструктура: деформації ЛЕП, підстанцій, газопроводів.
- Комунальне господарство: руйнування водогонів, каналізаційних систем.
- Промислові об'єкти: пошкодження виробничих цехів, приміщень.

Втрати у сільському господарстві:

- Ерозія ґрунтів: щорічні втрати до 10-15 т/га родючого шару
- Заболочування та засолення земель
- Зменшення площ орних земель через зсуви та провалення

Статистика збитків: за даними останніх років, прямі збитки від ЕГП досягають 5-7 млрд грн щорічно, причому у періоди екстремальних погодних умов ці показники зростають на 40-50%.

2. Непрямі економічні наслідки

Інвестиційна складова:

- Зниження рейтингу інвестиційної привабливості регіонів на 25-30%.
- Відмова від реалізації перспективних проектів у зонах підвищеного ризику. Підвищення вартості кредитування через зростання страхування ризиків.

Будівельна галузь:

- Збільшення кошторисної вартості будівництва на 15-20%. Необхідність додаткових геотехнічних досліджень. Використання спеціальних будівельних матеріалів та технологій

Витрати на протидію ЕГП:

- Щорічні витрати на моніторинг: 200-300 млн грн. Витрати на інженерний захист: 1,5-2 млрд грн. Рекультиваційні роботи: 500-700 млн грн.

3. Соціально-економічні наслідки

Демографічний вплив:

- Примусове переселення з небезпечних територій. Зміна структури

населення регіонів. Психологічні наслідки для мешканців.

Вплив на соціальну інфраструктуру:

- Навантаження на системи охорони здоров'я. Потреба в реконструкції соціальних об'єктів. Витрати на соціальну підтримку постраждалих.

4. Регіональний аналіз ризиків

Донбас: площа зон підвищеного ризику: понад 5 тис. км², загроза затоплення 40-50 шахт, ризик для 120 населених пунктів, потенційні збитки: 15-20 млрд грн.

Закарпаття: 120 селевих басейнів в активній фазі, загроза для 80 км автомобільних доріг, ризик для 25 населених пунктів.

Причорномор'я: абразія берегової лінії: 2-5 м/рік, загроза для портової інфраструктури, ризик затоплення прибережних територій.

5. Вплив на ключові галузі економіки

Гірничодобувна промисловість: збільшення собівартості видобутку на 20-25%, витрати на додаткові заходи безпеки, ризик припинення роботи.

Транспортна галузь: збільшення експлуатаційних витрат, необхідність частого ремонту доріг, втрати від перерв у транспортному сполученні.

Енергетика: ризики для об'єктів генерації, загрози для магістральних мереж, потенційні перерви у постачанні.

Таблиця 3.1

Аналітична таблиця геоекономічних ризиків екзогенних геологічних процесів у регіонах України

Регіон	Домінуючі ЕГП	Фактори формування ризику	Потенційні економічні збитки	Геоекономічна оцінка рівня ризику
Карпатський (Львівська, Івано-Франківська, Закарпатська, Чернівецька обл.)	Зсуви, селеві потоки, ерозія, паводки	Складний рельєф, інтенсивні опади, вирубка лісів, антропогенне перевантаження територій	Руйнування дорожньої інфраструктури, об'єктів туризму та ЖКГ; втрати лісових ресурсів	Дуже високий

Продовження таблиці 3.1

Подільський (Тернопільська, Хмельницька, Вінницька обл.)	Карст, просідання лесових грунтів, підтоплення	Поширення карбонатних товщ, меліоративні системи, зміна рівнів ґрунтових вод	Деформація будівель, с/г втрати, аварії інженерних мереж	Середній – високий
Поліський (Волинська, Рівненська, Житомирська, Київська обл.)	Підтоплення, заболочення, ерозія	Високий рівень ґрунтових вод, надмірне водорегулювання, торфові ґрунти	Зниження продуктивності земель, пошкодження доріг та меліоративних систем	Середній
Придніпровський (Дніпропетровська, Запорізька, частково Кіровоградська обл.)	Осідання над шахтами, підтоплення, ерозія	Густота шахтних виробок, інтенсивна промислова діяльність, техногенний вплив	Руйнування промислових об'єктів, інженерних споруд, підвищення витрат на моніторинг	Високий
Донбаський (Донецька, Луганська обл.)	Осідання земної поверхні, підтоплення, техногенні карсти	Масштабне закриття шахт, заповнення виробок, неконтрольований підйом підземних вод	Знищення інфраструктури, втрати житлового фонду, високі компенсаційні витрати держави	Дуже високий
Причорноморський (Одеська, Миколаївська, Херсонська обл.)	Абразія берегів, підтоплення, карст, піщані бурі	Низинні території, морські процеси, штормова активність, господарське освоєння узбережжя	Втрата земель, руйнування берегозахисних споруд, збитки туристичній індустрії	Середній – високий
Кримський регіон*	Абразія, карст, зсуви	Активні морські процеси, складний рельєф, насиченість карбонатами	Руйнування об'єктів рекреації, транспортної інфраструктури	Високий

*Тимчасово окупована територія.

Інтерпретація рівнів геоекономічного ризику.

Дуже високий — активна фаза ЕГП, регулярні збитки, значне навантаження на промисловість та інфраструктуру; потребує постійного моніторингу та інвестицій у захисні заходи.

Високий — ризики суттєво впливають на інвестиційну привабливість регіону та потребують планування заходів з інженерного захисту.

Середній — ризики локальні, але важливі при проектуванні об'єктів.

Низький (у таблиці відсутній, бо для України малохарактерний) — поодинокі прояви ЕГП.

Стратегічні напрями мінімізації ризиків

Організаційні заходи: створення єдиної системи моніторингу ЕГП, розробка регіональних програм захисту, впровадження системи страхування ризиків.

Технічні рішення: берегоукріплювальні споруди, протизсувні та протиселеві захисні споруди, системи дренажу та водовідведення.

Економічні механізми: державно-приватне партнерство, міжнародна технічна допомога, спеціальні бюджетні програми.

Геоекономічні ризики ЕГП в Україні потребують негайних дій: розробка Національної стратегії протидії ЕГП, створення Фонду рекультивації та захисту, впровадження сучасних систем моніторингу, розвиток міжрегіонального співробітництва, інтеграція до європейських програм з геологічної безпеки.

Ефективне управління ризиками ЕГП дозволить запобігти щорічним збиткам на рівні 8-10 млрд грн та забезпечити сталий розвиток регіонів України.

Комплексний аналіз екзогенних геологічних процесів в Україні свідчить, що їхній вплив має багатовимірний характер, охоплюючи економічну, соціальну, екологічну та інфраструктурну сфери. Геоекономічна оцінка таких ризиків повинна враховувати як прямі збитки, так і довгострокові системні наслідки, що формують потенціал сталого розвитку територій.

1. Інфраструктурні ризики. ЕГП спричиняють прогресуюче руйнування транспортних, промислових та житлово-комунальних об'єктів. За відсутності превентивних заходів ризики для об'єктів критичної інфраструктури прогнозовано зростатимуть. Особливо висока вразливість характерна для: об'єктів енергетики та магістральних мереж; автомобільних і залізничних коридорів міжнародного значення; прибережних територій з активною абразією та підтопленням.

Потенційні втрати від порушення логістики та енергозабезпечення можуть перевищувати 10–12 млрд грн щорічно.

2. Фінансово-економічні ризики. ЕГП призводять до підвищення вартості інвестиційних проєктів через необхідність проведення детальних інженерно-геологічних вишукувань, зміцнення основ та використання спеціалізованих технологій. Для окремих регіонів, насамперед Донбасу, інвестиційні премії за ризик зростають до 20–35%, що знижує інвестиційний попит і обмежує можливості розвитку нових секторів економіки.

3. Екологічні ризики та довгострокові втрати. ЕГП негативно впливають на: якість ґрунтів та водних ресурсів; біорізноманіття та природні екосистеми; здатність територій виконувати рекреаційні та господарські функції.

Тривалі наслідки включають деградацію земель, втрату ландшафтної стійкості та зниження продуктивного потенціалу територій. У Карпатському та Поліському регіонах екологічні втрати оцінюються у 2–3 млрд грн щорічно.

4. Соціально-демографічні ризики. Зростання інтенсивності екзогенних процесів призводить до: депопуляції небезпечних територій; зниження якості життя населення; збільшення бюджетного навантаження на соціальний сектор.

Найбільш уразливими є регіони з високою концентрацією малих населених пунктів у зонах ризику (Закарпаття, Донбас, Одеська область).

5. Воєнний фактор як каталізатор геологічних ризиків. Воєнні дії посилили існуючі процеси та спричинили появу нових ризиків: техногенні карсти та провали на місцях вибухів; забруднення ґрунтів та вод токсичними речовинами; порушення дренажних систем через обстріли; неконтрольоване затоплення шахт.

Це створює критичні передумови для масштабних геологічних зрушень, особливо у східних регіонах.

6. Ризики для підприємницької діяльності та сфери послуг. ЕГП впливають на роботу: аграрних підприємств (зниження урожайності, деградація ґрунтів); туристично-рекреаційного сектору (руйнування інфраструктури, зниження привабливості регіонів); малого бізнесу, розташованого у зонах підвищеної геодинамічної активності.

Для приватних господарств і МСП ризики проявляються у зростанні витрат на страхування, транспортну логістику та виробничу інфраструктуру.

На рис. 3.1. представлено теплову карту геоекономічних ризиків за регіонами України.

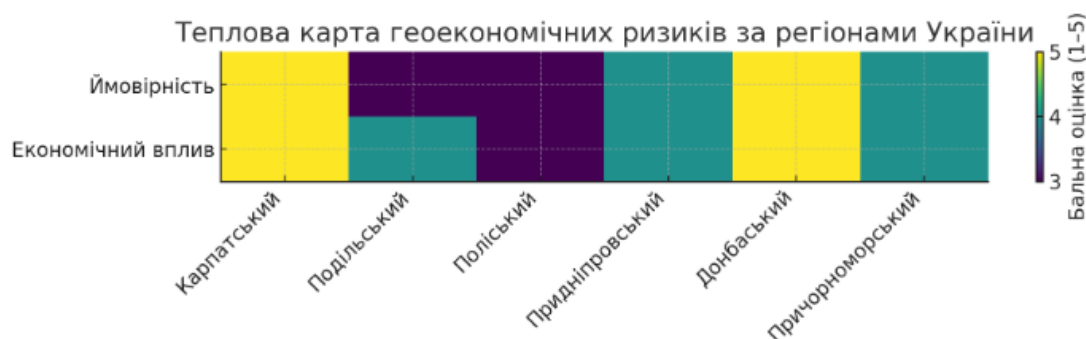


Рис. 3.1. Карта геоекономічних ризиків за регіонами України

Наведена теплова карта (Heatmap) є інструментом візуалізації інтегральної оцінки геоекономічних ризиків екзогенних геологічних процесів (ЕГП), що забезпечує швидкий ідентифікаційний аналіз загроз. Карта оперує двома ключовими вимірами, що формують загальний профіль ризику:

1. Вісь Імовірності (Верхній ряд). Цей ряд відображає ймовірність прояву ризику (P), тобто частоту та очікувану повторюваність розвитку активних ЕГП у певному регіоні (наприклад, зсувів, карсту, підтоплень). Науковий термін: Частота реалізації (Occurrence Frequency) або Геодинамічна активність. Інтерпретація кольору: Інтенсивність забарвлення прямо пропорційна частоті та/або масштабу геодинамічної активності. Вищий бал ризику (інтенсивніший колір) означає, що ймовірність виникнення або періодичність прояву ЕГП є високою, що вимагає постійного моніторингу та превентивних заходів.

2. Вісь Економічного Впливу (Нижній ряд). Цей ряд відображає ступінь економічного впливу, або наслідків (C), що виникають внаслідок реалізації ризику (прояву ЕГП). Вплив оцінюється за розміром прямих та непрямих економічних збитків.

Науковий термін: Масштаб наслідків (Severity of Consequences) або Потенційні збитки (Loss Magnitude). Інтерпретація кольору: Інтенсивність забарвлення прямо пропорційна фінансовому еквіваленту очікуваних збитків. Вищий бал ризику (інтенсивніший колір) вказує на катастрофічний або критичний рівень економічної шкоди для інфраструктури, виробництва та бюджету регіону, що підтверджує високий геоекономічний ризик.

Теплова карта чітко ідентифікує, що найбільшу системну загрозу економічній безпеці України становлять регіони, де ймовірність та економічний вплив є максимальними (5 балів). Стратегічні зусилля та фінансові ресурси необхідно в першу чергу спрямовувати на Донбаський, Карпатський, Придніпровський та Причорноморський регіони для інженерного захисту та посилення моніторингу.

Фінальний аналіз категорично виділяє чотири ключові регіони – Донбаський, Карпатський, Придніпровський та Причорноморський (з домінуванням Кримського в групі високого ризику) – як зону критичної геоекономічної загрози (оцінка 3–5 балів). У цих регіонах висока або

максимальна ймовірність прояву ЕГП безпосередньо поєднується з катастрофічним економічним впливом (руйнування інфраструктури, техногенні катастрофи, втрата стратегічних об'єктів).

Висновки до розділу 3

На підставі проведеного аналізу можна визначити такі ключові висновки щодо пріоритетів державної політики щодо переробки техногенних відходів вугільної промисловості:

Необхідність системної інституційної реформи. Управління відходами в Україні стримується функціональною роздробленістю повноважень, дублюванням контролюючих функцій, відсутністю єдиної методики оцінки небезпеки відходів та недостатньою координацією між органами влади. Це ускладнює створення ефективної національної системи переробки та рекультивації.

Важливість імплементації європейських норм. Ключовим пріоритетом є повномасштабне впровадження Директиви ЄС 2006/21/ЄС про управління відходами добувної промисловості. Це передбачає розробку національного законодавства, запровадження дозвільної системи, фінансових гарантій, планів управління відходами, систем моніторингу та процедур закриття об'єктів.

Створення ефективних економічних стимулів. Відсутність розвинених інструментів «зеленої» економіки (екологічне оподаткування, розширена відповідальність виробника, «зелені» інвестиції) гальмує технологічну модернізацію та перехід до циркулярної моделі. Необхідно сформувати фінансово-економічний механізм, що стимулюватиме запобігання утворенню відходів та їх переробку.

Критичний стан та ризики від накопичених відходів. Накопичення понад 20 млрд тонн відходів, з яких 85% – відходи гірничодобувного комплексу,

створює колосальний тиск на довкілля. Основні ризики пов'язані з забрудненням водних ресурсів, пиловими викидами, самозайманням та порушенням інженерно-геологічної стійкості територій. Зони впливу часто перевищують формальні санітарно-захисні зони.

Значні геоекономічні ризики екзогенних процесів. Екзогенні геологічні процеси (осідання, зсуви, підтоплення тощо), посилені гірничодобувною діяльністю, становлять серйозну загрозу економічній безпеці. Регіони Донбасу, Карпатський та Придніпровський мають «дуже високий» рівень ризику, що вимагає пріоритетних заходів щодо моніторингу, інженерного захисту та рекультивації.

Стратегічний пріоритет – запобігання та переробка. Подолання екологічної кризи вимагає переходу від практики видалення відходів до стратегії, заснованої на Європейській ієрархії поводження з відходами. Ключовими напрямками мають стати запобігання утворенню відходів, максимальне вторинне використання, переробка та екологічно безпечне видалення, що відповідає принципам циркулярної економіки.

Комплексний аналіз екзогенних геологічних процесів (ЕГП), підтверджений тепловою картою ризиків, свідчить, що найбільшу системну загрозу економічній безпеці України становлять чотири ключові регіони — Донбаський, Карпатський, Придніпровський та Причорноморський. У цих регіонах спостерігається критичне поєднання високої або максимальної ймовірності прояву ЕГП (геодинамічна активність) та катастрофічного рівня економічного впливу. Ризики мають багатовимірний характер, спричиняючи прогресуюче руйнування критичної інфраструктури, а також значні довгострокові екологічні та соціально-демографічні втрати. За відсутності превентивних заходів, потенційні річні втрати лише від порушення логістики та енергозабезпечення можуть перевищувати 10–12 млрд грн.

ВИСНОВКИ

На основі комплексного дослідження інституційних, економічних та технологічних аспектів переробки техногенних відходів вугільної промисловості України сформовано висновки, що розкривають глибинні причинно-наслідкові зв'язки та стратегічні перспективи вирішення проблеми.

1. Щорічне утворення понад 450 млн тонн промислових відходів, 94-95% яких припадає на видобувний та переробний сектор, свідчить про структурну неефективність матеріалоємної економіки. Накопичення близько 16 млрд тонн відходів (понад 350 т/особу) створює один з найвищих в Європі показників техногенного навантаження на одиницю площі ($21\,700\text{ т/км}^2$), що призводить до деградації земель, забруднення водних ресурсів, формування стійких геохімічних аномалій та підвищення ризиків для здоров'я населення.

2. Техногенні відходи — це «сплячий» ресурсний актив. Парадокс ситуації полягає в тому, що масштабне забруднення одночасно є потужним ресурсним потенціалом. Відходи вугільної промисловості (породні відвали, золошлаки, зола виносу) ідентифіковані як «техногенні родовища» з промисловими концентраціями рідкісних (Ga, Ge), рідкоземельних (Sc, Y, La, Ce) та кольорових металів (Zn, Cu, Ni). Це перетворює їх з об'єкта екологічних витрат на потенційний об'єкт інвестиційної діяльності в контексті глобального дефіциту критичної сировини.

Традиційні методи піро- та гідрометалургії неефективні для більшості техногенних відходів. Їх високі енерговитрати, агресивність та нерентабельність при низькому вмісті цільових компонентів роблять масове застосування неможливим.

Біотехнологічні методи, зокрема бактеріальне вилугування, визнані найперспективнішими. Вони пропонують низку ключових переваг:

- Екологічна безпека: відсутність токсичних реагентів, можливість працювати з нейтральними стоками.
- Економічна ефективність: низькі капітальні та експлуатаційні витрати, простота апаратного оформлення.
- Технологічна універсальність: придатність для бідних, складнокомпонентних та тонкодисперсних матеріалів, зокрема для вилучення германію та галію з вугільних відвалів і зол.
- Додаткова користь: біовилуговування призводить до детоксикації відходів і поліпшення їх фізико-механічних властивостей, що відкриває шляхи для подальшого використання у будівництві чи рекультивації.

Україна має власні розробки в цій галузі, що довели високу ефективність на практиці (наприклад, технологія переробки відвалів ЦЗФ «Червоноградська»). Це створює науково-технічну базу для імпортозаміщення та розвитку високотехнологічного експорту.

3. Інституційно-управлінський вимір: системна дисфункція як головна перешкода. Відсутність єдиної державної політики та координації. Функціональна роздробленість повноважень між численними органами влади (Міндовкілля, Міненерго, Мінреінтеграції, місцеві адміністрації) призводить до дублювання функцій, «віконськості» для інвесторів та неможливості реалізації комплексних програм.

Нормативно-правова база не відповідає європейським стандартам. Запізніла імплементація Директиви 2006/21/ЄС та відсутність таких ключових інструментів, як єдина методика класифікації небезпеки відходів, система фінансових гарантій, реєстр закритих об'єктів та ефективний моніторинг, роблять систему управління відходами неефективною та корупційно-вразливою.

Геоелекономічні ризики ігноруються. Екзогенні геологічні процеси (осідання, зсуви, підтоплення), посилені гірничодобувною діяльністю,

створюють прямі загрози інфраструктурі та життю людей, але не отримують належної оцінки в стратегіях регіонального розвитку.

4. Економічний вимір: відсутність ринкових стимулів для «зеленої» трансформації. Панує лінійна модель «видобути-використати-заховати». Відсутність ефективного екологічного оподаткування (податок на захоронення, вуглецевий податок), системи розширеної відповідальності виробника (EPR) та пільгового фінансування «зелених» інновацій робить інвестування в переробку відходів економічно не вигідним у порівнянні з їх простим депонуванням.

Не сформований ринок вторинної мінеральної сировини. Відсутність стандартів, системи логістики та гарантій збуту для продуктів переробки техногенних відходів робить бізнес-моделі в цій сфері надзвичайно ризикованими.

5. Стратегічні пріоритети та пропозиції. На основі вищевикладеного, розробка та реалізація державної політики має ґрунтуватися на наступних стратегічних засадах:

1. Інституційна консолідація: створення Єдиного координаційного центру з управління техногенними відходами з широкими повноваженнями; чітке розмежування функцій між органами влади та усунення дублювання; прискорена повноцінна імплементація Директиви 2006/21/ЄС та інших relevant acquis ЄС.

2. Економічне переозброєння: впровадження прогресивного екологічного податку на захоронення відходів, що робитиме переробку економічно привабливішою; запровадження принципів розширеної відповідальності виробника (EPR) для стимулювання замкнених циклів; створення державно-приватного фонду «зелених» інновацій для фінансування НДДКР та пілотних проектів з переробки відходів, зокрема з використанням біотехнологій; розробка та затвердження національних стандартів на продукцію з техногенної сировини.

3. Технологічний прорив передбачає виділення біотехнологій переробки як пріоритетного напрямку національної науково-технічної політики, державне замовлення на розробку та впровадження пілотних і промислових установок бактеріального вилуговування на базі ключових техногенних об'єктів (наприклад, у Львівсько-Волинському басейні), стимулювання створення технологічних кластерів з повним циклом (від вилучення рідкісних металів до виробництва готової продукції).

4. Управління ризиками передбачає розробку та впровадження Національної системи моніторингу екзогенних геологічних процесів у вугільних регіонах, формування пріоритетного реєстру найнебезпечніших об'єктів накопичення відходів для планування заходів з рекультивації, інтеграцію оцінки гео економічних ризиків у процедури стратегічного планування та ЕІА.

Узагальнюючи вищевикладене можна стверджувати, що перехід до циркулярної моделі управління техногенними відходами вугільної промисловості є для України не лише вимушеним кроком у рамках євроінтеграції, але й унікальним історичним шансом. Це шанс трансформувати масштабну екологічну загрозу в джерело ресурсної незалежності, стимул для інноваційного розвитку високотехнологічного сектору економіки та основу для соціально-економічного відродження депресивних гірничодобувних регіонів. Реалізація цього потенціалу вимагає не поодиноких заходів, а цілісної, послідовної та довгострокової державної політики, заснованої на принципах єдності, інноваційності та економічної доцільності.

Комплексний аналіз екзогенних геологічних процесів (ЕГП), підтверджений тепловою картою ризиків, свідчить, що найбільшу системну загрозу економічній безпеці України становлять чотири ключові регіони — Донбаський, Карпатський, Придніпровський та Причорноморський. У цих регіонах спостерігається критичне поєднання високої або максимальної

ймовірності прояву ЕГП (геодинамічна активність) та катастрофічного рівня економічного впливу. Ризики мають багатовимірний характер, спричиняючи прогресуюче руйнування критичної інфраструктури, а також значні довгострокові екологічні та соціально-демографічні втрати. За відсутності превентивних заходів, потенційні річні втрати лише від порушення логістики та енергозабезпечення можуть перевищувати 10–12 млрд грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру URL: <https://land.gov.ua/>
2. Міністерство соціальної політики, сім'ї та єдності України. URL: <https://www.msp.gov.ua/>
3. Міністерство розвитку громад та територій України. URL: <https://mindev.gov.ua/>
4. Конституція України: Закон України від 28 червня 1996 р. № 254к/96-ВР / Верховна Рада України. Відомості Верховної Ради України. 1996. № 30. Ст. 141.
5. Державне агентство лісових ресурсів України URL: <https://forest.gov.ua/>
6. Державне агентство водних ресурсів України. URL: <https://www.davr.gov.ua/>
7. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України URL: <https://saee.gov.ua/>
8. Національна академія наук України URL: <https://www.nas.gov.ua/>
9. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління URL: <https://pdp.nacs.gov.ua/providers/derzhavna-ekolohichna-akademiia-pisliadyplomnoi-osvity-ta-upravlinnia>
10. Гірничо-металургійний комплекс України (цифри, факти, коментарі): бізнес-довідник / В. І. Большаков, та ін. за заг. ред. В. А. Гнатуш : Київ, 2019. 732 с.
11. Сучасні ресурсозберігаючі технології. Проблеми і перспективи: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції : Одеса : Видавництво ОНУ імені І. І. Мечникова, 2015. 300 с.
12. Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України [Електронний ресурс]. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/>.
13. Офіційний сайт ДТЕК [Електронний ресурс]. URL: <https://energo.dtek.com/>.

14. Офіційний сайт ПАТ «Львівська вугільна компанія» [Електронний ресурс]. URL: <http://www.lvug.com.ua/>.
15. Офіційний сайт Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України [Електронний ресурс]. URL: <https://mepr.gov.ua/>.
16. Вовк В. Т., Чепига Е. В. Экология шахтерских регионов Украины // Уголь Украины, 2015. С. 23–30.
17. КОДЕКС УКРАЇНИ ПРО НАДРА зі змінами від 18.12.2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/132/94-%D0%B2%D1%80#Text>)
18. Закон України «Про відходи» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-%D0%B2%D1%80#Text>
19. Закон України «Про управління відходами» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20/stru>
20. Економіко-правові аспекти господарювання: сучасний стан, ефективність та перспективи. Матеріали XI Міжнародній науково-практичній конференції 10-11 жовтня 2025 року URL: <https://dspace.oneu.edu.ua/handle/123456789/20077>
21. Блайда І. А., Баранов В. І., Васильєва Т. В., Васильєва Н. Ю., Немерцалов В. В., Слюсаренко Л. І., Камська В. А. Комплексна оцінка відходів вуглезбагачення з точки зору їх фітотоксичності, можливості вторинної переробки та детоксикації // Енерготехнології і ресурсозбереження. 2012. № 2. С. 37–43.
22. Kumar S., Katoria D., Sehgal D. Environment Impact Assessment of Thermal Power Plant for Sustainable Development // International Journal of Environmental Engineering and Management. 2013. Vol. 4, No. 6. P. 567–572.
23. Eurostat / European Environment Agency – дані по recycling rate та municipal waste (2021–2022). eea.europa.eu+1
24. OECD – Enhancing Regional Mining Ecosystems in the European Union (2025) – аналітика щодо гірничих відходів та регіональних впливів. OECD+1

25. Державна служба статистики України – Довкілля України. Статистичний збірник (дані 2019–2021) та оперативні таблиці (накопичені відходи $\approx 15,6$ –16 млрд т). ukrstat.gov.ua+1
26. Municipal waste statistics. Офіційний сайт Європейського Союзу: веб-сайт. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/10360.pdf>
27. Рідкісні метали України — погляд у майбутнє / за ред. Л. С. Галецького. — Київ : Інститут геологічних наук НАН України, 2021. 117 с.
28. Галецький Л. С., Науменко У. З., Пилипчик А. Д. Техногенні родовища – нове нетрадиційне джерело мінеральної сировини в Україні //Екологія довкілля та забезпечення життєдіяльності. 2022. № 5-6. - С. 77-81.
29. Павличенко А. В. Технологічні напрями переробки відходів вуглезбагачення/ А. В. Павличенко, О. А. Гайдай, В. Е. Фірсова, В. В. Руських, І. В. Ткач /Збірник наукових праць НГУ. Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2020. № 62. С. 139-148. URL: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/62.139>
30. І. А. Блайда, Т. В. Васильєва, Л. І. Слюсаренко, І. М. Барба, В. О. Іваниця. Склад і вилюговуюча активність мікробіоценозу техногенних відходів енергетики // Проблеми екологічної біотехнології. – [електронне наукове видання]. 2013. №1. URL: <http://jrnل.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/4592>
31. Баранов В., Баня А., Боднар Л., Блайда І., Карпенко О. Токсикологічний аналіз води дренажних каналів і золи золівдвалів Добротвірської ТЕС // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. 2014. Вип.65. С. 238–244.
32. Blayda I., Vasyleva T., Baranov V., Slysarenko L., Shulyakova S., Brodiazhenko T. Composition of Aboriginal Consortium of Microorganisms from Coal Mines Dumps // БіологічніСтудії / *Studia Biologica* . 2017: 11, N 2. С. 67–78.
33. Kathryn S. Auernik, Robert M. Kelly. Physiological Versatility of the Extremely Thermoacidophilic Archaeon *Metallosphaera sedula* Supported by Transcriptomic Analysis of Heterotrophic, Autotrophic, and Mixotrophic Growth // *Applied and Environmental Microbiology*. 2010. 76, № 3. P. 931–935.

34. UNIDO – Baseline report: Circular economy in Ukraine» (2024) – показники циркулярності, оцінки ресайклінгу. URL: unido.org
35. Організаційно-економічні засади формування систем управління відходами в регіонах України: науково-аналітична доповідь / наук. ред. д.е.н., с.н.с. Колодійчук І. А. Львів: ІРД НАНУ, 2022. 170 с.
36. Циркулярна смарт-спеціалізація старопромислових шахтарських регіонів України: монографія / Д. Ю. Череватський, М. О. Солдак, О. В. Лях, Ю. С. Залознова та ін.; за заг. ред. О. І. Амоші / НАН України, Ін-т економіки пром-сті. Київ, 2020. 196 с. ISBN 978-966-02-9406-6 (електронне видання)