

© Ю.І. Григор'єв¹, Д.В. Швець¹, О.В. Ільченко¹, С.І. Балак¹, І.Є. Григор'єв²

¹ Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

² ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», Запоріжжя, Україна

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОГЕННИХ РОДОВИЩ ЗАЛІЗОВМІСНОЇ СИРОВИНИ ЯК НАУКОВИЙ БАЗИС ДЛЯ ЇЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ МУЛЬТИСЕНСОРНОЇ ДЕТЕКЦІЇ

Y. Hryhoriev¹, <https://orcid.org/0000-0002-1780-5759>

D. Shvets¹, <https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>

O. Ilchenko¹, <https://orcid.org/0000-0001-7167-7308>

S. Balyk¹, <https://orcid.org/0009-0004-1699-3307>

I. Hryhoriev² <https://orcid.org/0009-0006-2787-106X>

¹ Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

² Technical University «Metinvest Polytechnic» LLC, Zaporizhzhia, Ukraine

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF MAN-MADE DEPOSITS OF IRON-CONTAINING RAW MATERIALS AS A SCIENTIFIC BASIS FOR ITS AUTOMATED MULTI-SENSOR DETECTION

Мета. Головною метою наведеного дослідження є комплексний аналіз сучасного стану техногенних родовищ залізорудної сировини насипного та намивного типу, а також визначення перспективних технологічних кроків до їх залучення у виробничий цикл.

Методика дослідження базується на комплексному поєднанні ретроспективного, описативного ситуаційного та каузального аналізу стану техногенних об'єктів із науковим обґрунтуванням застосування мультисенсорного дистанційного їх зондування для побудови тривимірних моделей розподілу корисного компонента.

Результати. Для перевірки робочої гіпотези щодо впливу повторного метасоматозу мінеральних компонентів у тілі техногенних родовищ на їх структуру було проведено комплексний аналіз їх стану. Систематизовано дані щодо ресурсного потенціалу техногенних об'єктів найбільших ГЗК регіону. Виявлено стримуючі фактори освоєння техногенних масивів, серед яких ключовими є відсутність достовірних моделей внутрішньої структури та складність збагачення тонкодисперсних окислених руд. Відмічено перспективність впровадження дистанційних методів зондування та мобільних сегрегаційних комплексів для забезпечення селективного виймання багатших ділянок.

Наукова новизна статті полягає в комплексному аналізі, що спрямований на визначення сучасного стану мінерально-сировинної бази, сформованої техногенними родовищами. Підтверджений зв'язок між гравітаційною диференціацією матеріалу при намиві хвостосховищ та раціональними параметрами системи розробки при їх відпрацюванні. Набула подальшого розвитку концепція «інтелектуального родовища» стосовно техногенних утворень, яка передбачає злиття даних мультисенсорних систем для побудови більш достовірних цифрових моделей масивів із невизначеною морфологією.

Практичне значення. Розроблено технічний базис для проектування технологічних схем відкритої розробки, що дозволяють мінімізувати втрати та розубожування при вилученні техногенної сировини. Результати дослідження можуть бути використані гірничо-збагачувальними комбінатами для трансформації екологічних ризиків у стратегічні активи.

Ключові слова: техногенне родовище, селективне виймання, геологічна невизначеність, якість сировини, сталий розвиток.

Вступ. Сучасний етап розвитку світової гірничо-металургійної індустрії характеризується фундаментальною зміною парадигми надрокористування, зумовленою вичерпанням запасів багатих природних руд, ускладненням гірничо-геологічних умов видобутку та імперативами сталого розвитку. В умовах переходу до «Індустрії 4.0» та посилення вимог щодо декарбонізації промисловості, техногенні утворення гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) перестають розглядатися виключно як екологічний тягар, трансформуючись у категорію стратегічних техногенних родовищ [1, 2].

Для України, яка володіє однією з найпотужніших у світі мінерально-сировинних баз заліза, питання комплексної переробки відходів збагачення Криворізького залізорудного басейну набуває критичної актуальності. Це зумовлено не лише необхідністю мінімізації техногенного навантаження на довкілля, але й потребою у забезпеченні сировинної незалежності вітчизняної промисловості в умовах повоєнної відбудови, а також залученні у європейські ланцюги поставок критичної сировини [3].

Аналіз проблематики питання. Аналіз літературних джерел показав, що на сьогоднішній день світова гірничо-промисловість щорічно генерує близько 1,4 млрд тонн хвостів збагачення залізорудної продукції. Основними продуцентами яких є Австралія, Бразилія, Китай та Україна. Накопичені за десятиліття інтенсивної експлуатації надр обсяги відходів у Кривбасі вимірюються мільярдами тонн, причому вміст корисного компонента (заліза загального, $Fe_{заг}$) у них варіюється в широких межах – 8–55%, що часто є співставним із вмістом заліза у бідних природних рудах, які залучаються до промислової переробки в інших країнах світу [2, 4].

Проте, незважаючи на значний ресурсний потенціал, рівень залучення техногенних родовищ до господарського обігу в Україні залишається низьким. До основних стримуючих факторів слід віднести наступні:

1. Відсутність достовірних даних про внутрішню структуру, розподіл корисного компонента та фізико-механічні властивості техногенних масивів, які виникають через особливості технологічних операцій відвалоутворення і в подальшому зазнають змін внаслідок процесів гіпергенезу та техногенного метасоматозу.

2. Відсутність ефективних технологій відпрацювання техногенних родовищ невизначеної геологічної будови як наслідок попереднього пункту.

3. Складність збагачення тонкодисперсних окислених руд та наявність зростків, що складно розкриваються.

4. Відсутність чітких механізмів перекваліфікації відходів у техногенні родовища та стимулюючого податкового законодавства.

Традиційні методи розвідки, зокрема колонкове буріння та шурфування, характеризуються високою вартістю, дискретністю отриманих даних та неможливістю гарантувати безпеку робіт на нестійких поверхах хвостосховищ. Водночас, існуючі підходи до дистанційного зондування здебільшого застосовуються фрагментарно (окремо або аерофотозйомка, або магнітометрія), що не дозволяє побудувати достовірну 3D-модель розподілу корисного компонента в умовах

складної седиментаційної зональності та техногенного метасоматозу. Таким чином, стають неможливим не тільки відпрацювання таких родовищ, а й навіть вибір технологічної схеми і проектування розробки.

Метою дослідження є ретроспективний, дискриптивний ситуаційний та каузальний аналіз, спрямований на визначення сучасного стану мінерально-сировинної бази, сформованої техногенними родовищами, а також причин відмічених технологічних розривів між їх станом та технологіями освоєння, що дозволить аргументовано підходити до вибору підходів до відкритої розробки техногенних родовищ.

Основна частина. Техногенні родовища Криворізького басейну є складними інженерно-геологічними системами, сформованими в результаті складування продуктів переробки залізистих кварцитів і багатих руд. За генетичними ознаками та агрегатним станом їх можна класифікувати на дві основні групи, кожна з яких вимагає специфічних технологічних підходів до розвідки та відпрацювання.

Найбільш перспективними техногенними об'єктами на сьогоднішній день вбачаються хвостосховища мокрого магнітного збагачення. Складені вони переважно тонкодисперсним матеріалом – шлами та пісками. Гранулометричний склад хвостів характеризується переважанням фракцій менше 0,074 мм, причому майже половина матеріалу представлена класами менше 0,04 мм. Основними рудними мінералами є магнетит (Fe_3O_4), гематит (Fe_2O_3), мартит та гідроксиди заліза (гетит FeOOH , лімоніт). Нерудна частина представлена кварцом (SiO_2), силікатами та карбонатами. Вміст заліза у хвостах магнетитових кварцитів зазвичай становить 8–15%, тоді як у хвостах збагачення окислених руд та гематитових кварцитів він може сягати 30–45% і більше. Високий вміст кремнезему (18–65%) та глинозему (до 15%) визначає необхідність глибокого збагачення для отримання концентратів, що відповідають сучасним вимогам кондицій на товарну продукцію [5].

Важливою особливістю хвостосховищ є їхня седиментаційна шаруватість, що виникає через гравітаційну диференціацію матеріалу. Більш важкі та крупні частинки, що містять залізо, осаджуються поблизу випусків пульповодів – пляжної зони, тоді як тонкі глинисті фракції (шлами) переносяться у ставкову зону [6]. Це власне і формує зональність розподілу корисного компонента, яку необхідно враховувати при розвідці і виборі технологічної схеми відпрацювання.

Відвали розкривних порід та некондиційних руд представлені скельними породами, некондиційною рудою та окисленими кварцитами, що були вилучені з кар'єрів, але не підлягали переробці за технологіями свого часу.

Станом на 2025 рік у відвалах ГЗК Кривбасу накопичено близько 2,5 млрд тонн гематитових кварцитів та окислених руд. За різними оцінками, від 500 до 700 млн тонн даної сировини заскладовано селективно або без істотного змішування з пустими породами. Ці фактори визначають пріоритетність залучення даних об'єктів до вторинної переробки.

На відміну від хвостосховищ, техногенна сировина у відвалах потребує повного циклу рудопідготовки, включаючи також дроблення та подрібнення, що

відповідно підвищує собівартість переробки. В той же час, дана сировина, як правило, характеризується вищим вихідним вмістом заліза, що сягає до 25–40%. Однак, в той же час під впливом атмосферних опадів, кисню з повітря, діяльності мікроорганізмів та внутрішніх хімічних реакцій у них відбуваються процеси гіпергенезу, які можна охарактеризувати як комплексний техногенний метасоматоз:

1. Залишковий магнетит у поверхневих шарах частково окислюється до гематиту та мартиту, що змінює його магнітні властивості та знижує ефективність традиційної магнітної сепарації.

2. Інфільтрація атмосферних вод сприяє розчиненню та міграції розчинних солей та металів. Як наслідок, у нижніх горизонтах хвостосховищ можуть формуватися зони вторинного збагачення або цементації, що хоч і ускладнює розробку, але локалізує корисний компонент.

Зміна економічних, політичних і логістичних факторів середовища господарювання гірничодобувних підприємств вплинула не тільки на показники випуску готової продукції, а й на обсяги та якість складування відходів та тимчасово некондиційної сировини. Так, ПрАТ «Північний ГЗК» є флагманом у впровадженні інноваційних технологій переробки бідних та техногенних руд. У період 2022–2024 років, в умовах втрати доступу до маріупольських металургійних комбінатів та блокування портів, підприємство здійснило стратегічну переорієнтацію на європейські ринки. Комбінат налагодив виробництво високоякісних окатишів із вмістом заліза понад 65% та концентрат із вмістом Fe 68%, що відповідає вимогам Direct Reduction (DR-grade) технологій. Станом на сьогоднішній день відвали та хвостосховища ПівнГЗК містять значні обсяги окислених кварцитів та хвостів збагачення, які розглядаються як резервна база для підтримки потужностей в умовах дефіциту видобутку сирової руди з кар'єрів комбінату [7].

Щодо ПрАТ «Інгулецький ГЗК», то хоч він і скоротив обсяги виробничої потужності, хвостосховище Інгулецького ГЗК залишається одним з найбільших техногенних об'єктів регіону. За даними на 2024 рік, обсяг накопичених відходів у хвостосховищі оцінюється у 283 млн м³. Специфікою ІнГЗК є переробка переважно магнетитових кварцитів, що зумовлює наявність у хвостах значної кількості тонкодисперсного магнетиту, втраченого на стадіях магнітної сепарації [7]. Висока наповненість сховища в період активного функціонування підприємства спонукала до проєктування нових приймальних ємностей. Однак на сьогоднішній день доцільнішим виглядає питання про необхідність його розвантаження шляхом вторинної переробки або рекультивації.

ПрАТ «Південний ГЗК» демонструє високі показники якості концентрату (65,0–68,5% Fe), що свідчить про ефективність діючих технологічних схем збагачення. Хвостосховища комбінату характеризуються складною будовою та наявністю зон з підвищеним вмістом заліза, сформованих у періоди менш досконалих технологій збагачення минулих десятиліть, седиментованих у нижніх шарах [7].

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» реалізує масштабну інвестиційну програму з модернізації хвостового господарства. У зв'язку з вичерпанням ресурсу

хвостосховищ «Миролюбівське» та «Об'єднане», у 2022–2024 роках ведеться будівництво хвостосховища «Третя карта» з корисною ємністю близько 280 млн м³, що забезпечить складування відходів на наступні 30 років. В той же час, закриття старих хвостосховищ відкриває можливість для їх детальної розвідки за новітніми технологіями та подальшим залучення до вторинної переробки.

Зведена інформація по актуальному стану хвостосховищ Кривбасу наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри хвостосховищ Кривбасу [3, 8]

Хвостосховище	Площа, га	Ємність, млн. м ³	Річний обсяг хвостів, млн. м ³
«Об'єднане» (Карта IV)	350-550	320	2,5-3,5
Войкове	250	156,5	4,5-5,5
Хвостосховище ІНГЗК	915	379	до 3,8
«Миролюбівка»	324	107	4,0-5,0
Хвостосховище ЦГЗК	685	290	3,5-4,5
Хвостосховище ПівНГЗК	1293	466	5,0-6,5

Показовим є позитивний досвід відпрацювання хвостосховища ПРАТ «Центральний ГЗК», сформованого в результаті складування відходів збагачення магнетитових кварцитів.

Результати дослідження просторових неоднорідностей через гравітаційну диференціацію наведені в таблиці 2. Дані аналізу проб із різних точок хвостосховища [9] підтверджують цю тенденцію.

Таблиця 2

Дані опробування хвостосховища ПРАТ «Центральний ГЗК» [9]

Точка відбору	Відстань від пульповипуску, м	Вміст Fe _{заг} , %	Фракція <0,05 мм, %
ПЗ-1 (Пляж)	50	53,2	51,0
ПЗ-2	150	41,8	68,5
ПЗ-3	350	32,5	82,4
СЗ-1 (Ставок)	550	25,1	93,7

На рис. 1 наведений узагальнений графік залежності вмісту заліза від відстані до точки скидання пульпи. Значення Fe_{магн}=38,5% при Fe_{заг}=53,2% означає, що більша частка усього заліза в цій точці знаходиться в магнітній формі. Решта заліза в пляжній зоні може бути представлена гематитом, мартитом або гідроксидами заліза, що утворилися внаслідок процесів техногенного метасоматозу та окислення. По мірі віддалення від пляжної зони до ставкової частка магнітного заліза скорочується, при чому швидше, ніж загального заліза.

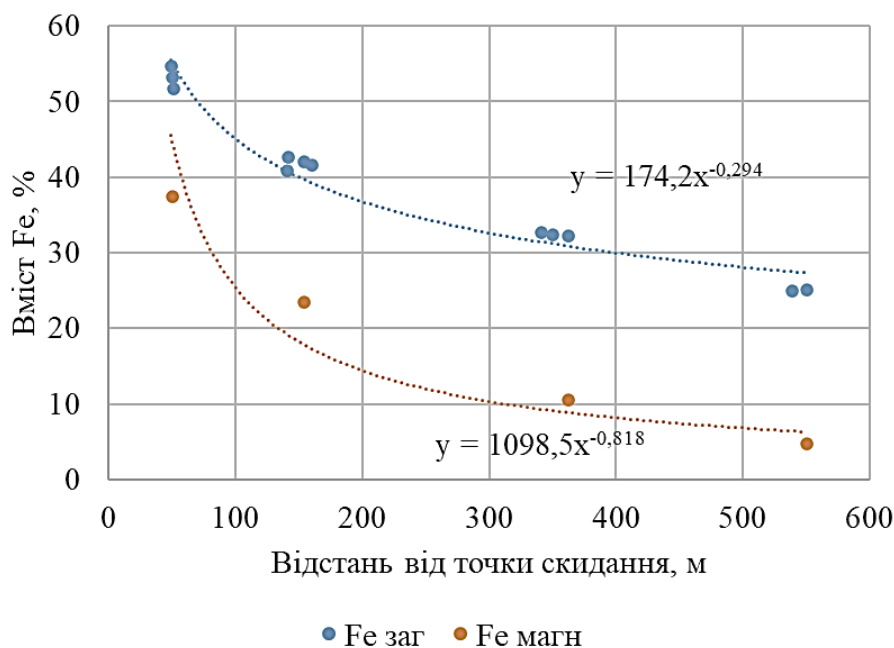


Рис. 1. Графік поширення заліза в хвостосховищі відносно точки скидання пульпи [9]

Наведений графік відображає лише загальну тенденцію, яка вже наочно ілюструє проявлення гравітаційної сегрегації. Однак для побудови достовірних математичних моделей необхідна більш широка вибірка даних опробування, яку складно отримати доступними методами.

Поетапний план відпрацювання техногенного родовища наведено на рис. 2.

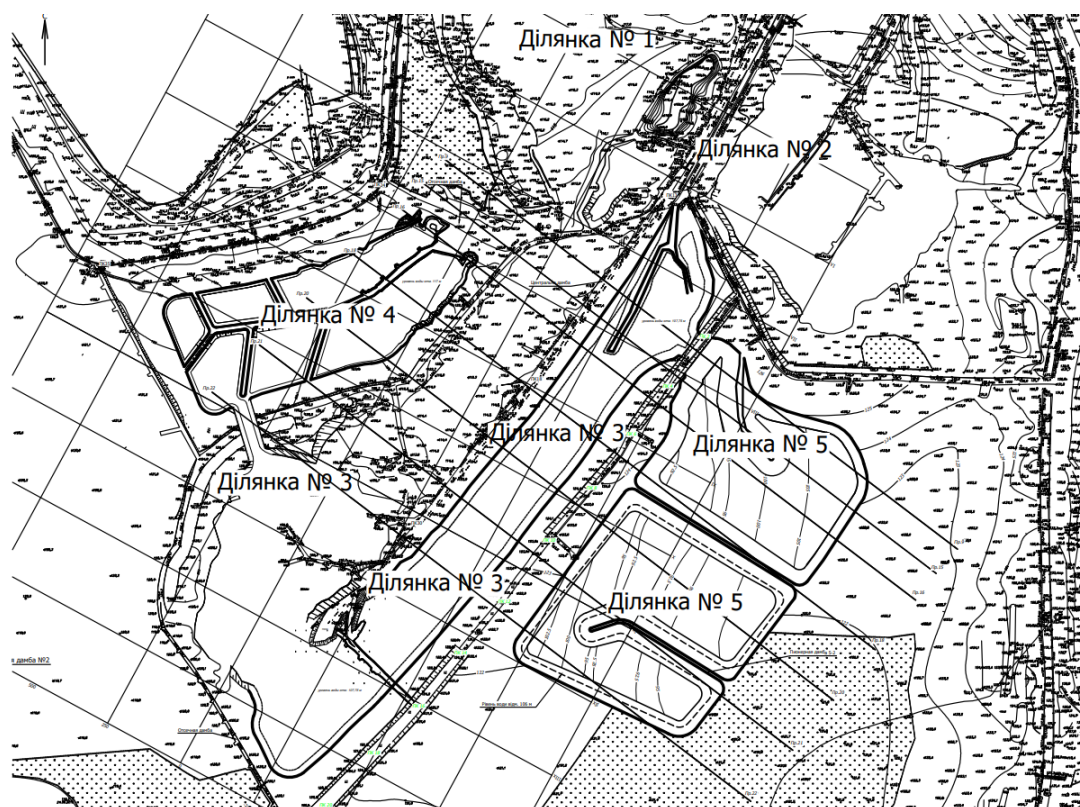


Рис. 2. Поетапний план розробки хвостосховища ПрАТ «Центральний ГЗК»

Особливу роль у формуванні сприятливих умов для повторного вилучення заліза відіграли природно-техногенні фактори функціонування хвостосховища. Значна ємність об'єкта у поєднанні з локалізованим скиданням пульпи у верхній частині балки саме й сприяли розвитку процесів гравітаційної диференціації твердої фази. Динаміка осадження частинок у потоці пульпи має закономірний характер: у міру зниження швидкості її руху послідовно випадають спочатку крупні та важкі, а згодом — дрібніші й легші фракції, що супроводжується поступовим зменшенням концентрації заліза у віддалених від місця скидання ділянках.

Водночас тривале перебування хвостів у мінералізованому водному середовищі обумовило процеси самочинного диспергування зростків рудних і нерудних мінералів. Це, у свою чергу, забезпечило додаткове розкриття рудної складової та підвищило ефективність подальших операцій класифікації й збагачення.

Таким чином, у межах хвостосховища сформувався техногенно модифікована, збагачена залізом частина матеріалу, яка є придатною для промислового вилучення із отриманням кондиційних залізородних концентратів, а також супутньої продукції у вигляді будівельних пісків.

Як було зазначено в ході аналізу, існуючі підходи до дистанційного зондування здебільшого застосовуються фрагментарно, що унеможлиблює побудову достовірної просторової 3D-моделі розподілу корисного компонента в умовах складної седиментаційної зональності і часткової визначеності мінерального складу. Відповідно, стає неможливим обґрунтований вибір технологічної схеми та проектування параметрів відкритої розробки техногенних родовищ. Складність використання традиційних підходів, таких як колонкове буріння, полягає у їхній високій вартості, значній дискретності отримуваних даних та критичній небезпеці виконання робіт на нестійких поверхнях законсервованих хвостосховищ. В умовах же насипних техногенних родовищ, складених крупнокусковою сировиною, такий підхід і зовсім неможливий [10]. Все це призводить до збільшення втрат і розубоження в приконттактних та перехідних зонах техногенних родовищ.

Наведені обмежуючі фактори безальтернативно підводять до доцільності пошуку та подальшого впровадження новітніх, комплексних методів попередньої та операційної просторової детекції розподілу корисного компоненту. Використання лише одного типу даних (тільки магнітометрії або аерофотозйомки) не дає достовірної картини через високий рівень шумів, неоднорідність середовища та обмежену глибинність досліджень. Пропоноване злиття даних мульти-сенсорної зйомки дозволяє компенсувати недоліки окремих датчиків. Однак математична обробка таких сигналів передбачає використання більш складних алгоритмів глибокого навчання. В перспективі це дозволить виявляти нелінійні зв'язки між різними типами сигналів і будувати більш достовірні моделі розподілу корисного компонента навіть за умови неповної визначеності морфологічної структури.

У сучасних умовах повоєнної відбудови та інтенсифікації розвитку гірничої справи України, особливої перспективи набуває концепція використання спеціалізованих технічних рішень для розвідки складноструктурних масивів.

Застосування безпілотних систем (БПЛА), оснащених чутливими магнітометричними датчиками та георадарами, дозволяє не лише здійснювати прецизійне дистанційне картування залізозмісних покладів та зон техногенного метасоматозу. Такий комплексний підхід гарантує безпеку ведення подальших відкритих гірничих робіт на рекультивованих чи раніше залишених об'єктах, одночасно вирішуючи проблему невизначеності геологічної будови масивів. Наявність достовірної цифрової моделі просторового розподілу мінеральної сировини є технічним базисом для переходу безпосередньо до технології її вилучення: починаючи зі схеми і на пряму розкриття й до параметрів елементів системи розробки. Враховуючи, що хвостосховища складені переважно тонкодисперсним матеріалом із домінуючим переважанням фракцій менше 0,074 мм і характеризуються яскраво вираженою седиментаційною шаруватістю, традиційні методи механічної екскавації також потребують суттєвої адаптації.

Ефективне відпрацювання родовищ з невизначеною геологічною структурою, навіть в межах виділених багатих ділянок, має базуватися на принципах селективного виймання локалізованих збагачених ділянок, що дозволить звести до мінімуму втрати та розубожування корисного компонента. Ефективне відпрацювання родовищ має передбачати відповідні технічні рішення. В цьому контексті пропонується додати у технологічний комплекс механізації розробки і мобільну сегрегаційну установку, адаптовану під умови експлуатації на хвостосховищі [11]. У статті [12] розглядається застосування мобільних сегрегаційних комплексів переважно для техногенних родовищ, сформованих у вигляді породних відвалів. Однак базові принципи просторової організації робіт та адаптивного керування рудопотоком є цілком релевантними і в контексті відпрацювання хвостосховищ. Єдиною суттєвою відмінністю для хвостосховищ буде відсутність потреби у потужній стадії дроблення, оскільки хвости вже представлені тонкодисперсним матеріалом. Більш того, тривале перебування тонкодисперсних хвостів у мінералізованому водному середовищі, що зумовило їхнє самочинне диспергування та додаткове розкриття рудної складової, створює додаткові передумови для розкриття мінеральних зерен.

Висновки. Проведений аналіз поточного стану мінерально-сировинної бази гірничо-збагачувальних комбінатів Криворізького басейну аргументовано підтверджує необхідність фундаментальної зміни парадигми поводження з техногенними утвореннями. Закономірне погіршення умов відпрацювання геогенних запасів багатих природних руд на фоні накопичення промислових відходів імперативно вимагають переходу до активного промислового освоєння техногенних родовищ.

Суттєвим стримуючим фактором залишається невизначеність їхньої геологічної будови, що ставить дві технологічні задачі: попередню та операційну розвідку, а також пошук техніко-технологічної схеми відпрацювання таких техногенних об'єктів. Це формує гостру потребу у розробці та впровадженні новітніх дистанційних методів детекції, серед яких ключове місце належить мультисенсорним інтелектуальним комплексам. Подальше використання таких комплексів дозволить отримати більш широкую вибірку даних для побудови багатофакторних

кореляційних моделей поширення корисного компонента та його предиктивного виявлення. Впровадження пропонованих інноваційних методів моніторингу, поєднане з технологіями селективного виймання та передзбагачення, здатне перетворити екологічний тягар підприємств на їх стратегічний актив.

Стрімкий розвиток технічних засобів дистанційного дослідження властивостей мінеральної сировини, а також стрибкоподібний прогрес інформаційних технологій визначають напрями подальших досліджень: розробка мультисенсорного комплексу дистанційного зондування техногенних утворень мінеральної сировини; розробка інтелектуальних алгоритмів злиття даних, отриманих з різних сенсорів; обґрунтування безпечних і ефективних технологій збору даних розробленим комплексом; подальше вдосконалення технологій відкритих гірничих робіт для відпрацювання родовищ з невизначеною морфологічною будовою.

Перелік посилань

1. United Nations. (2012). *Resolution adopted by the General Assembly on 27 July 2012. The future we want* (A/RES/66/288). <https://sdgs.un.org/documents/res66288-resolution-adopted-general-19882>
2. Hryhoriev, Y., Lutsenko, S., Systierov, O., Kuttybayev, A., & Kuttybayeva, A. (2023). Implementation of sustainable development approaches by creating the mining cluster: the case of MPP “Inguletskiy”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254, 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012055>
3. Жуков, С. О., Григор’єв, Ю. І., & Луценко, С. О. (2022). Аналіз технологічних підходів і досвіду відпрацювання хвостосховищ Кривбасу. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 71, 53–61. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.053>
4. Antonik, V., Babets, E., Antonik, I., & Melnikova, I. (2022). Ways to reduce technogenic landscape disturbances in mining production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049, 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012002>
5. Kolesnikov, D.V., Korolenko, M.K., Stupnik, N.I., Udod, E.G., Protasov, V.P., & Oleynik, T.A. (2012). *Povyshenie izvlecheniya zheleza za schet pererabotki syrya tekhnogennykh mestorozhdeniy Krivbassa*. Dionis.
6. Medvedeva, O.A. (2012). Khvostokhranilishcha Krivbassa, problemy i osobennosti ikh ekspluatatsii. *Geotekhnicheskaya mekhanika*, 103, 279–285.
7. Група Метінвест. (2024). *Звіти про сталій розвиток (ESG) та екологічні декларації*. <https://metinvestholding.com/Content/Entities/Report/38/en/%20metinvest-annual-report-2024.pdf>
8. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2026). *Єдиний реєстр з оцінки впливу на довкілля*. <https://eia.menr.gov.ua/>
9. Ponomar, V., Ovsienko, V., Cherevko, Y., & Brik, A. (2024). Mineral magnetic modification of fine iron ore tailings and their beneficiation in alternating magnetic fields. *Metals*, 14(1), Article 26. <https://doi.org/10.3390/met14010026>
10. Григор’єв І.Є., Григор’єв Ю.І., Усачов В.Е., & Євтушенко М.С. (2018). Технологія відпрацювання техногенного родовища відкритими рудоскатами. *Збірник наукових праць НГУ*, 56, 18–28. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/153977>
11. Григор’єв, Ю. І., Луценко, С. О., Григор’єв, І. Є., & Тітов, Д. А. (2024). *Спосіб відпрацювання техногенного родовища із використанням мобільного комплексу рудопідготовки* (Патент № 157228 Україна). Державний реєстр патентів України на корисні моделі.
12. Hryhoriev, Y., Shvets, Y., Joukov, S., Smirnov, O., & Hryhoriev, I. (2024). Enhancing the adaptability of a mining complex in a dynamic environment by utilizing the technology for the development of a man-made deposit with a mobile ore preparation complex. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348, 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012007>

ABSTRACT

Purpose. The main goal of the above study is to provide a comprehensive analysis of the current state of man-made iron ore deposits, both bulk and alluvial, and to identify promising technological steps for their integration into the production cycle.

The methodology is based on a complex combination of retrospective, descriptive situational, and causal analysis of the state of man-made objects, with scientific justification for the use of multisensor remote sensing to build three-dimensional models of the distribution of the useful component.

Findings. To verify the working hypothesis regarding the influence of repeated metasomatism of mineral components in the body of technogenic deposits on their structure, a comprehensive analysis of their condition was conducted. Data on the resource potential of technogenic objects of the largest mining complexes of the region were systematized. Restraining factors for the development of technogenic massifs were identified, among which the key ones are the lack of reliable models of the internal structure and the complexity of enriching finely dispersed oxidized ores. The prospects of implementing remote sensing methods and mobile segregation complexes to ensure selective extraction of richer areas were noted.

The originality of the article lies in the comprehensive analysis aimed at determining the current state of the mineral resource base formed by technogenic deposits. The connection between the gravitational differentiation of the material during the alluvial deposits and the rational parameters of the development system during their development has been confirmed. The concept of an “intellectual deposit” in relation to technogenic formations has been further developed, involving data fusion from multisensor systems to build more reliable digital models of arrays with uncertain morphology.

Practical implementation. A technical basis has been developed for the design of open-pit mining technological schemes that allow minimizing losses and depletion during the extraction of man-made raw materials. The study's results can be used by mining and processing plants to transform environmental risks into strategic assets.

Keywords: *man-made deposit, selective extraction, geological uncertainty, raw material quality, sustainable development.*

дата першого надходження статті до видання	11.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	12.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.03.2026