

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Інститут (факультет) Біотехнології та екологічного контролю
Кафедра Екології та екоменеджменту

«До захисту в ЕК»

Директор інституту (декан факультету)

Наталія ГРЕГІРЧАК

(підпис)

(ім'я та прізвище)

« 09 » грудня 2025 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Ігор ЯКИМЕНКО

(підпис)

(ім'я та прізвище)

« 09 » грудня 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності 101 «Екологія»

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Екологія, екоменеджмент та екоаудит» на
тему: Аналіз та вибір оптимальних технологій рекультивації земель АТ «Південний
гірничо-збагачувальний комбінат»

Виконав: здобувач II курсу, групи 2 М

Козакова Аліса Романівна

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник Котинський Андрій Валерійович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Рецензент

Анатолій САЛЮК

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Я як здобувачка Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувачка

(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Біотехнології та екологічного контролю

Кафедра Екології та екоменеджменту

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 101 «Екологія»

(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Екологія, екоменеджмент та екоаудит»

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Ігор ЯКИМЕНКО

“ 30 ” вересня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Козакової Аліси Романівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Аналіз та вибір оптимальних технологій рекультивації земель АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат»»

керівник роботи Котинський Андрій Валерійович, кандидат технічних наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 5 ” листопада 2025 року № 912кс

1. Строк подання здобувачем роботи 09 грудня 2025 р.
2. Вихідні дані до роботи геоекологічна характеристика території розміщення АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат»; дані щодо утворення, складу та властивостей техногенних відвалів підприємства; результати лабораторних аналізів фізико-хімічних показників техногенних субстратів; наукові та нормативні джерела з проблем рекультивації порушених земель гірничодобувної промисловості та екології.
3. Наукова література з фіторекультивації, фіторемедіації, ґрунтознавства; Дані з публікацій про екотоксикологію регіону Кривбасу; Методичні вказівки щодо проведення модельних експериментів з рослинами.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ; обґрунтування актуальності проблеми деградації земель у зоні впливу АТ «ПівдГЗК»; характеристику виробничої діяльності підприємства та джерел утворення відходів; аналіз фізико-хімічних властивостей техногенних субстратів; огляд і порівняльний аналіз сучасних методів рекультивації порушених земель; оцінку нормативно-правових вимог у сфері рекультивації; обґрунтування вибору оптимальної комбінованої технології рекультивації для АТ «ПівдГЗК»; формулювання висновків. Висновки; Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 30.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	30.09.2025 – 06.10.2025	Виконано
2.	Збір та аналіз літературних джерел, вивчення нормативних актів, формулювання гіпотези	07.10.2025 – 27.10.2025	Виконано
3.	Характеристика АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» та його техногенних відвалів	28.10.2025 – 03.11.2025	Виконано
4.	Аналіз складу й властивостей техногенних субстратів	04.11.2025– 15.11.2025	Виконано
5.	Огляд і порівняльний аналіз методів рекультивациі порушених земель	16.11.2025 – 22.11.2025	Виконано
6.	Обґрунтування вибору оптимальної комбінованої технології рекультивациі;	23.11.2025 – 28.11.2025	Виконано
7.	Оформлення пояснювальної записки, формулювання висновків та підготовка роботи до захисту	29.11.2025 – 10.12.2025	Виконано
8.	Підготовка презентації	10.12.2025- 15.12.2025	Виконано

Здобувач

(підпис)

Аліса КОЗАКОВА

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Андрій КОТИНСЬКИЙ

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Козакова А.Р. Аналіз та вибір оптимальних технологій рекультивації земель АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 101 «Екологія» (ОПП «Екологія, екоменеджмент та екоаудит»). — Національний університет харчових технологій МОН України, Київ, 2025.

У роботі проведено комплексний аналіз фізико-хімічних властивостей відвальних субстратів АТ «ПівдГЗК» та оцінено ефективність сучасних методів їх відновлення. Обґрунтовано застосування комбінованої технології рекультивації, що поєднує інженерну стабілізацію рельєфу, створення вологоутримуючих екранів та біологічну етапність.

Наукова новизна кваліфікаційної роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні оптимального алгоритму комбінованої рекультивації для скельних відвалів Кривбасу .

Практичне значення роботи полягає у розробці прикладних рекомендацій щодо поетапного впровадження фітомеліоративних та лісомеліоративних заходів на АТ «ПівдГЗК», оцінці їх ефективності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РЕКУЛЬТИВАЦІЯ ЗЕМЕЛЬ, ПІВДЕННИЙ ГЗК, ВІДВАЛЬНІ СУБСТРАТИ, КОМБІНОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ, ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ, ВАЖКІ МЕТАЛИ, ЛІСОМЕЛІОРАЦІЯ, , ТЕХНОГЕННИЙ ЛАНДШАФТ.

ABSTRACT

Kozakova A.R. Analysis and selection of optimal land reclamation technologies for JSC "Southern Iron Ore Enrichment Plant" — Qualifying scientific work as a manuscript. Master's degree qualifying thesis in specialty 101 "Ecology" (Educational-professional program "Ecology, Eco-management, and Eco-audit"). — National University of Food Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The work provides a comprehensive analysis of the physicochemical properties of the waste substrates at JSC "Southern GOK" (UGOK) and evaluates the effectiveness of modern restoration methods. The application of combined reclamation technology is substantiated, integrating engineering stabilization of the relief, the creation of moisture-retaining screens, and biological staging.

Scientific novelty of the qualifying work lies in the theoretical substantiation of an optimal algorithm for combined reclamation specifically for the rocky waste dumps of the Kryvyi Rih Iron Ore Basin.

Practical significance of the work consists in the development of applied recommendations for the phased implementation of phytomeliorative and forest meliorative measures at JSC "Southern GOK", along with an assessment of their effectiveness.

KEYWORDS: LAND RECLAMATION, SOUTHERN GOK, WASTE SUBSTRATES, COMBINED TECHNOLOGY, PHYTOREMEDIATION, HEAVY METALS, FOREST MELIORATION, TECHNOGENIC LANDSCAPE.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1	
ХАРАКТЕРИСТИКА ПІДПРИЄМСТВА ТА ЙОГО ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ.....	10
1.1 Природно-географічні умови району розміщення підприємства.....	10
1.2 Загальна характеристика АТ «ПівдГЗК».....	11
1.3 Асортимент продукції АТ ПівдГЗК	14
1.4 Сировинна база, водні й енергетичні ресурси АТ «ПівдГЗК».....	16
1.5 Технологія виробництва продукту.....	18
1.6 Джерела утворення відходів на підприємстві.....	20
1.7 Характеристика відходів на підприємств.....	21
1.8 Фізико-хімічні властивості відвальних субстратів АТ ПівдГЗК.....	23
1.8.1. Мінералогічний склад, гранулометрія та кислотність.....	24
1.8.2. Вміст макро- та мікроелементів, включаючи важкі метали.....	26
1.9 Екологічний вплив техногенних відвалів ПівдГЗК на довкілля.....	29
1.9.1. Вплив на ґрунти, воду та рослинний покрив.....	29
1.9.2. Потенційні ризики для здоров'я людини та біорізноманіття.....	31
1.10 Аналіз технології утилізації відходів на підприємстві.....	32
РОЗДІЛ 2	
АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЙ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ПОРУШЕНИХ ЗЕМЕЛЬ АТ «ПІВДЕННИЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ КОМБІНАТ».....	34
2.1 Сутність рекультивациі порушених земель та її значення	34
2.2 Нормативно-правові вимоги до рекультивациі в Україні.....	35
2.3 Класифікація та оцінка придатності техногенних порід для рекультивациі	37

2.4 Основні принципи вибору напрямку та виду рекультивації порушених земель	38
2.5 Напрями рекультивації порушених земель	40
2.6 Методи технічної рекультивації	42
2.6.1 Грубе планування та виположування схилів	43
2.6.2. Терасування схилів як головний етап технічної рекультивації	45
2.6.3 Нейтралізація кислотності техногенних порід	47
2.6.4 Екранування, знімання та повторне використання родючого шару ґрунту	50
2.7. Біологічний етап та основні біологічні методи рекультивації порушених земель	51
2.7.1 Загальні вимоги та завдання біологічного етапу рекультивації	51
2.7.2. Природне заростання відвальних ландшафтів як біологічний метод рекультивації	54
2.7.3. Агротехнічні методи біологічної рекультивації	55
2.7.4. Фітомеліорація та травосіяння	57
2.7.5. Лісомеліоративні методи рекультивації	60
2.7.6. Біоремедіаційні методи	62
2.7.7. Мікробіологічні методи відновлення ґрунтів	63
2.8. Порівняльний аналіз ефективності методів рекультивації відвальних ландшафтів	65
2.9 Обґрунтування вибору комбінованої технології рекультивації для АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат»	74
ВИСНОВКИ	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

АТ	Акціонерне товариство
ГДК	гранично допустима концентрація
ГЗК	гірничо-збагачувальний комбінат
ЕМ	ефективні мікроорганізми
ПММ	пально-мастильні матеріали

ВСТУП

Гірничо-видобувна промисловість України є однією з ключових галузей економіки, що забезпечує значну частину експортних надходжень і створює тисячі робочих місць. За даними Державної служби статистики, у 2021 році видобуток залізної руди в Україні становив близько 81 млн т, а за підсумками лютого 2023 року експорт залізорудної сировини сягав 1,215 млн т за місяць. Крім того, українські металурги демонструють поступове відновлення виробництва: обсяг сталі у 2024 році зріс до 7,58 млн т, що на 21,6% більше, ніж у попередньому періоді.

Одним із провідних підприємств у галузі є АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат». В середньому комбінат забезпечує видобуток близько 34 млн т гірничої маси руди щорічно, з яких сирої руди – приблизно 18 млн т. Незважаючи на стабільну продуктивність, діяльність підприємства супроводжується низкою екологічних проблем, властивих усім гірничій промисловості.

Інтенсивне використання надр веде до накопичення великих обсягів відходів. За даними екологічного моніторингу, відходи виробництва можуть становити понад 5 млн м³ на рік, що негативно впливає на якість ґрунтів та водних ресурсів у регіоні. Забруднення повітря, ґрунту та водних об'єктів створює додаткові ризики для здоров'я місцевого населення та загального екологічного стану довкілля.

Мета дослідження полягає у проведенні комплексного аналізу застосовуваних та потенційних технологій рекультивації порушених земель АТ «ПівдГЗК» та обґрунтуванні вибору найбільш оптимальних методів, що відповідають екологічним та економічним критеріям.

Завданнями дослідження є аналіз виробничої діяльності та екологічних проблем АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат», оцінка існуючих технологій рекультивації порушених земель, визначення їх переваг і недоліків та обґрунтування вибору оптимальної екологічно доцільної технології рекультивації.

Об'єктом дослідження є порушені землі та техногенні відвали, що формуються внаслідок гірничо-видобувної діяльності АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат».

Предметом дослідження є екологічні аспекти застосування різних технологій рекультивації порушених земель та їх ефективність у відновленні ґрунтового покриву.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 101 «Екологія» освітньо-професійної програми «Екологія, екоменеджмент та екоаудит» є самостійною роботою здобувача.

Особистий внесок автора полягає в аналізі екологічних проблем, пов'язаних із порушенням земель унаслідок діяльності АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат», опрацюванні інформації з наукових та відкритих джерел, порівняльній оцінці існуючих технологій рекультивації та обґрунтуванні вибору оптимального підходу з урахуванням специфіки підприємства.

Планування етапів виконання кваліфікаційної роботи, аналіз матеріалів, підготовка тексту та формування висновків здійснювалися здобувачем самостійно під безпосереднім керівництвом доцента, кандидата технічних наук Котинського Андрія Валерійовича.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів та висновків при розробленні природоохоронних заходів, програм рекультивації порушених земель та екологічної модернізації гірничо-видобувних підприємств.

Робота складається зі вступу, двох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг – 84 сторінок, включає 9 таблиць, 13 рисунків та 40 джерел наукової літератури.

РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ПІДПРИЄМСТВА ТА ЙОГО ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ

1.1 Природно-географічні умови району розміщення підприємства

Криворізький залізорудний басейн розташований у межах північностепової зони України та характеризується специфічними природно-географічними умовами, що значною мірою визначають особливості господарського освоєння території та характер антропогенного навантаження. Клімат регіону є помірно-континентальним із недостатнім зволоженням, спекотним і посушливим літом та відносно м'якою зимою з нестійким сніговим покривом. Для території характерні часті посухи, висока випаровуваність і дефіцит вологи протягом більшої частини року, що впливає на стан ґрунтів, водних ресурсів і природної рослинності.¹

Ґрунтовий покрив регіону представлений переважно чорноземами звичайними та південними малогумусними, які в природних умовах відзначаються високою родючістю. Водночас інтенсивне промислове освоєння, розчленований рельєф і розвиток балкової мережі зумовлюють поширення ерозійних процесів та зниження якісних показників ґрунтів. У межах промислових зон і прилеглих територій спостерігається трансформація природного ґрунтового покриву, що є характерною рисою гірничо-промислових ландшафтів Криворіжжя.¹

Гідрологічні умови району характеризуються слабо розвиненою річковою мережею та обмеженими запасами поверхневих вод. Основною водною артерією є річка Інгулець, яка зазнає значного антропогенного впливу внаслідок зарегулювання стоку та використання водних ресурсів для потреб промисловості й населення. Дефіцит води та підвищене антропогенне навантаження формують складну екологічну ситуацію в регіоні, особливо в межах промислово освоєних територій.²

Природна рослинність Криворіжжя представлена фрагментами різнотравно-злакових степів, які збереглися переважно на схилах балок, у заповідних ділянках та на територіях, менш залучених до господарського використання. Флора і фауна

регіону зазнали істотної антропогенної трансформації, проте окремі природні комплекси залишаються важливими елементами екологічної структури території.³

Поєднання посушливих кліматичних умов, обмежених водних ресурсів, трансформованого ґрунтового покриву та високого рівня промислового освоєння формує специфічні природно-екологічні умови Криворізького регіону. У цих умовах функціонують провідні гірничо-видобувні підприємства, зокрема АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат», характеристика виробничої діяльності та екологічних аспектів якого буде розглянута у наступному підрозділі.

1.2 Загальна характеристика АТ «ПівдГЗК»

АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» – перший гірничо-збагачувальний комбінат Криворізького залізорудного басейну, розташований на однойменному житловому масиві міста Кривий Ріг. Комбінат спеціалізується на переробці залізної руди шляхом отримання залізорудного концентрату та агломерату. Залізорудний агломерат виробляється для внутрішнього ринку України, тоді як майже 60 % концентрату експортується до Китаю, що свідчить про високий рівень конкурентоспроможності продукції ПівдГЗК.

Підприємство знаходиться під спільним контролем «Метінвест Холдинг», що дозволяє йому зберігати стабільність на ринку завдяки залученню сучасних технологій та ефективному управлінню.

Перший етап роботи комбінату почався у 1955 році, коли була введена в експлуатацію перша черга, а друга черга запрацювала у 1961 році. Значний історичний рубіж відзначено у лютому 1966 року, коли колектив ПівдГЗК був нагороджений орденом Трудового Червоного Прапора за видатні досягнення у виробничій діяльності. Сировинна база комбінату формується на основі кварцитів Скелеватського родовища, розташованого в центральній частині залізорудного басейну, де найбільш продуктивним є сьомий залізистий горизонт. Родовище відробляється відкритим способом із максимальним розміром рудних шматків до 1200 мм.⁴

За період реконструкції та технічного переозброєння, що завершився до 1980 року, ПівдГЗК досяг визначних виробничих потужностей: видобуток сирової руди сягав 35,5 млн т, виробництво залізорудного концентрату – 17,2 млн т, а агломерату – 8,3 млн т. До 1990 року ці показники становили основу стабільної роботи підприємства, що свідчило про високий рівень технологічної підготовки та ефективності виробничих процесів.

На початку 1990-х років економічна криза, пов'язана з перебудовою національної економіки, суттєво вплинула на роботу підприємства. Проте завдяки впровадженню заходів щодо реструктуризації та модернізації виробничих процесів виробництво було відновлено на початку 2000-х років, що дозволило повернути підприємство до стабільної роботи та забезпечити виконання виробничих планів.

У другій половині 2000-х років ПівдГЗК почав активно залучати інвестиції для оновлення технологічного обладнання та модернізації виробничих ліній. Наприклад, у 2007 році приватні інвестори придбали значну частку активів комбінату, що відкрило нові перспективи для подальшого розвитку. Цей крок став каталізатором для подальших модернізаційних проектів.⁴

Протягом останніх років комбінат здійснював низку капітальних ремонтів і модернізаційних робіт. У 2017 році на збагачувальній фабриці №1 було проведено капітальний ремонт двох секцій. Завдяки цим роботам майже повністю оновлено обладнання на всіх технологічних ділянках: подрібнення, сепарації, фільтрації, а також встановлено потужні насоси для забезпечення стабільної роботи технологічного процесу. У 2018 році підприємство інвестувало 63 млн грн у оновлення гірничої техніки, придбавши два великовантажних кар'єрних самоскиди типу БелАЗ із вантажопідйомністю 130 т. Протягом того ж року на збагачувальній фабриці №1 було вклало понад 680 млн грн у модернізацію обладнання та заміну будівельних конструкцій, що дозволило підвищити ефективність виробничих процесів та зменшити експлуатаційні витрати. У березні 2019 року було проведено ще один важливий етап модернізації: частину акцій комбінату було продано за \$32,3 млн, що засвідчило зацікавленість інвесторів у розвитку підприємства та сприяло подальшій оптимізації його фінансової структури.

Однією з унікальних особливостей ПівдГЗК є його роль як об'єкта індустріального туризму. Найбільший відкритий промисловий кар'єр комбінату є популярною туристичною атракцією для екстремалів та шанувальників промислової історії не лише в Україні, але й за кордоном. ⁴

Туристи можуть ознайомитися з масштабами виробничих потужностей, процесами збагачення руди та історією підприємства. Такі екскурсії сприяють підвищенню обізнаності про важливість гірничо-збагачувальної промисловості в економіці країни, а також про необхідність екологічної модернізації виробництва.

Узагальнена характеристика АТ «ПівдГЗК» представлена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Узагальнена характеристика АТ «ПівдГЗК»⁵

Повне найменування юридичної особи	АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО ПІВДЕННИЙ ГІРНИЧО- ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ КОМБІНАТ
Скорочена назва	АТ «ПівдГЗК»
Назва англійською	JOINT-STOCK COMPANY YUZHNIY GOK (JSC YUZHNIY GOK)
Код ЄДРПОУ	00191000
Розмір статутного капіталу	397 684 010,00 грн.
Організаційно-правова форма	Акціонерне товариство
Основний вид діяльності за КВЕД	07.10 Добування залізних руд
Інші види діяльності за КВЕД	10.13 Виробництво м'ясних продуктів 10.85 Виробництво готової їжі та страв 42.99 Будівництво інших споруд, н.в.і.у. 46.12 Діяльність посередників у торгівлі паливом, рудами, металами та промисловими хімічними речовинами
Місцезнаходження юридичної особи	вулиця Макаренка, 6, Кривий Ріг, Дніпропетровська область, 50001
Уповноважені особи	Федін Костянтин Анатолійович

На рисунку 1.1 зображено зовнішній вигляд АТ «ПівдГЗК» та його кар'єрів.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд АТ «ПівдГЗК» та його кар'єрів

1.3 Асортимент продукції АТ «ПівдГЗК»

АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» спеціалізується на виробництві двох основних напівфабрикатів для металургії – висококонцентрованого залізорудного концентрату з вмістом Fe близько 67,7 % та доменного агломерату з Fe $\approx$ 58,2 %. Концентрат є ключовим експортним продуктом підприємства: близько 50–60 % виробленого обсягу спрямовується на зовнішні ринки, переважно до Китаю, тоді як агломерат повністю реалізується всередині України.

Проектні потужності комбінату в 2020 році становили видобуток сирової руди на рівні 26 млн т, збагачення – 12 млн т концентрату та 2 млн т агломерату, що дозволяє ПівдГЗК залишатися одним із лідерів гірничо-збагачувального сектору країни.⁶

Залізорудний концентрат

Продукція ПівдГЗК представлена двома марками концентрату:

- *КЗ (з вмістом Fe понад 65 %)*
- *КЗВ (зі збалансованим вмістом домішок і підвищеним виглядом корисного металу).*

Руду дроблять до фракцій, придатних для магнітної сепарації, після чого кілька разів проходять через потужні сепаратори, що дозволяє виводити домішки та підвищувати вміст заліза до 67–68 %. Кінцевий продукт характеризується низькою вологістю й однорідним гранулометричним складом, що робить його універсальним сировинним компонентом для виробництва окатишів, брикетів або прямої

металургійної плавки після додаткової агломерації чи гранулювання. На експорт спрямовується 50–60 % концентрату, що підтверджує його конкурентоспроможність на світовому ринку та забезпечує значні валютні надходження для комбінату.

На рисунку 1.2 зображено залізорудний концентрат, вироблений на АТ «ПівдГЗК».



Рисунок 1.2 – Залізорудний концентрат, вироблений на АТ «ПівдГЗК»

Доменний агломерат

Доменний агломерат ПівдГЗК виготовляється шляхом спікання фракцій концентрату разом із залізорудним пилом і флюсовими добавками в агломераційних барабанах, що дозволяє отримувати продукт із середнім вмістом заліза на рівні 58,18 % Fe і оптимальною газопроникністю шихти для доменних печей.

Цей агломерат відрізняється формою і розміром гранул, які забезпечують високу міцність на стиск, знижують витрати вугілля та покращують коефіцієнт корисної дії печі. У 2020 році весь обсяг виробленого агломерату — понад 2 млн т — було реалізовано на внутрішньому ринку України, що дозволило підтримати стабільну взаємодію між комбінатом та вітчизняними металургійними заводами.⁶

На рисунку 1.3 зображено доменний агломерат, вироблений на АТ «ПівдГЗК».



Рисунок 1.3 – Доменний агломерат, вироблений на АТ «ПівдГЗК»

У 2020 році ПівдГЗК забезпечив видобуток 26 млн т сирової руди, яка надходила на збагачення через систему гідротранспорту у вигляді пульпи та дробильно-сепараційні лінії. Потужності комбінату дозволяють переробляти до 14 млн т пульпи на збагачувальних фабриках із подальшим отриманням приблизно 12 млн т концентрату та 2 млн т агломерату на рік.

Більшість концентрату (до 60 %) експортується в країни Азії, що робить ПівдГЗК одним із ключових постачальників української залізорудної сировини на міжнародному ринку. Агломерат же повністю спрямовується на внутрішній ринок, сприяючи безперебійній роботі доменних цехів металургійних комбінатів України.

1.4 Сировинна база, водні й енергетичні ресурси АТ «ПівдГЗК»

АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» має потужну і стратегічно важливу сировинну, водну та енергетичну базу, яка забезпечує безперервну роботу виробництва та високу конкурентоспроможність на ринку.

Сировинним джерелом для ПівдГЗК є Скелеватське родовище магнетитових кварцитів — одне з найбільших в межах Криворізького залізорудного басейну. Родовище розташоване в центральній частині Кривбасу, на південь від річки Інгулець, і займає стратегічне положення для промисловості регіону. Загальні геологічні запаси сягали, станом на 2020 рік, приблизно 962,2 млн т магнетитових кварцитів, а також 53,6 млн т окиснених кварцитів. Ці показники забезпечують комбінату ресурсну незалежність та стабільність щонайменше на декілька десятиліть.

Видобуток руди здійснюється відкритим кар'єрним способом на сьомому залізистому горизонті — це найбільш продуктивний і насичений рудою пласт у межах розроблюваної території. Величезні гірничі відвали й кар'єри формуються внаслідок вибухових робіт, після чого великогабаритна руда, діаметром до 1200 мм, транспортується для подальшого дроблення та збагачення. Технологічна схема розробки дозволяє ефективно керувати якістю сировини, змішувати різні типи руд для досягнення стабільного хімічного складу та оптимізувати витрати.

Функціонування комбінату вимагає колосальних обсягів води, основною метою якої є гідротранспорт пульпи — суміші подрібненої руди з водою, яка подається трубопроводами між технологічними вузлами (дробарні, збагачувальні фабрики, хвостосховища). У 2020 році комбінат споживав близько 410 млн м³ води на рік (до згущення пульпи), що робить його одним з найбільших споживачів технічної води в Україні.

Основним джерелом водопостачання слугує Південне водосховище, яке заповнюється водою із Дніпровсько–Криворізького каналу — це ключовий інженерний об'єкт, створений у середині XX століття спеціально для промислового водопостачання Криворіжжя. Водозабір із Дніпра здійснюється централізовано, після чого вода надходить на комбінат системою каналів і трубопроводів.

Функціонування гірничо-збагачувального комбінату є надзвичайно енергоємним. Величезна частка енергії витрачається на гідротранспорт пульпи, насосні станції, дробильне та збагачувальне обладнання. У 2020 році, згідно з техніко-економічними розрахунками, споживання електроенергії на гідротранспорт пульпи склало близько 213 млн кВт·год. Якщо врахувати витрати на всі інші етапи технологічного процесу (дроблення, подрібнення, сепарація, сушка тощо), загальне річне споживання енергії перевищило 300 млн кВт·год.⁶

Підприємство повністю забезпечується привізною електроенергією з мережі ДТЕК, що гарантує стабільність постачання та можливість регулювання споживання згідно з виробничими циклами. На об'єктах комбінату розташовані власні трансформаторні підстанції та розподільчі щити, що дозволяють розподіляти потужності залежно від потреб цехів.⁶

Окремі споживачі, такі як насосні станції, дробарні та агломераційні установки, є найбільш енергоємними об'єктами, де впроваджуються сучасні системи контролю та оптимізації енергоспоживання. Це дозволяє знижувати питомі витрати електроенергії на одиницю продукції.

1.5 Технологія виробництва продукту

Технологічний процес отримання залізорудного концентрату на Південному гірничо-збагачувальному комбінаті починається з відкритого способу видобутку рудної маси у кар'єрі Скелеватського родовища, де щоденно проводяться гірничі роботи за допомогою великовантажних самоскидів «БелАЗ» та екскаваторів видобувається в середньому близько 100 000 т гірської маси. Максимальний розмір блоків руди після розкривних робіт не перевищує 1 200 мм, що дозволяє подавати породну масу без попереднього дроблення безпосередньо на дробильно-транспортний комплекс. Річний обсяг видобутку руди становить близько 33,7 млн т з яких на первинну підготовку надходить приблизно 18 млн т сировини.

Після видобутку руда автотранспортом транспортується до двох основних дробильних цехів, де здійснюється чотироступенева схема попереднього дроблення. На першому етапі горизонтальні щокові дробарки типу ККД 1500/180 знижують фракцію до 600–800 мм, далі матеріал надходить на конусні дробарки КСД 2200, де розмір грудок зменшується до 300–350 мм, після чого проходить через конусні дробарки КМД 2200, що доводять крупність до 150–200 мм. Заключним у ланцюгу дроблення є конусні дробарки типу КРД 900/100, які формують вихідну фракцію розміром 70–100 мм і забезпечують рівномірне надходження матеріалу до накопичувальних бункерів зважування. Місткість кожного з трьох накопичувальних бункерів становить 4 500 т що дозволяє створювати безперебійну подачу руди до збагачувальних фабрик № 1 та № 2 із продуктивністю по 1500 т/год кожна.⁶

На фабриках реалізується триступенева система мокрого подрібнення із застосуванням лабораторно контрольованих шарових млинів: перші два — млини МШЦ 3,6 × 4,0 та МШЦ 4,5 × 5,0, оснащені корпусами діаметром відповідно 3,6 м і 4,5 м та довжинами барабанів 4,0 м та 5,0 м; третій — млин МШЦ 3,6 × 5,5 із діаметром 3,6 м і довжиною 5,5 м. На першому млиновому полі об'єм завантаження куль діаметром 100 мм становить 20 м³, а швидкість обертання ротора — 15 об/хв, що дозволяє знизити середню крупність до 15 мм. Після кожного млина пульпа

класифікується у двоспиральних класифікаторах із продуктивністю 450 м³/год, де матеріал із крупністю понад 0,074 мм повертається на повторне подрібнення, а фракція до 0,074 мм — далі піддається процесу збагачення. Під час третьої стадії подрібнення у млині МШЦ 3,6 × 5,5 утворюється пульпа з твердим вмістом 62–65 %, щільністю близько 1,25 кг/л та середньою крупністю 0,05 мм, що відповідає оптимальним умовам для магнітної сепарації. Збагачення магнетитово-гематитових руд здійснюється за п'ятиступеневою схемою магнітної сепарації із застосуванням низькопольових та високопольових сепараторів типу ПБМ-120/300.⁶

Спочатку пульпа протікає через чотири блоки низькопольових сепараторів (площа кожного стола 12 м²), де вилучаються найбільш магнітні частки (первинний електропульп). Частка магнетиту, що вилучається на цьому етапі, становить близько 32–34 % загального об'єму пульпи і містить до 45 % Fe. Промпродукт передається на перший блок високопольових сепараторів НЕМ-380 з індукцією поля 12 кГс, де вловлюються магнітні зерна середньої інтенсивності (марки КЗВ: 68–68,5 % Fe). Продуктивність одного стола НЕМ-380 у таких умовах становить 200 т/добу концентрату зі схемою безперервної подачі пульпи 120 м³/год. Решта матеріалу, зниженої магнітності (з вмістом Fe близько 28–30 %), надходить на другий блок високопольових сепараторів НЕМ-330 (індукція поля 10 кГс), де вилучаються дрібнодисперсні частки магнетиту та гематиту, що дає додатковий вихід концентрату на рівні 2 % від первісної маси сировини. Паралельно відбувається відділення шламів (хвости флотації) на магнітних дешламаторах МД-12А, де густина пульпи підтримується 22–28 % твердого (1,20–1,25 кг/л), а піски виходять із часткою твердого 42–45 % (щільність 1,35–1,45 кг/л).⁶

Після завершення магнітної сепарації концентрат з вмістом загального заліза 65,04–65,31 % та магнітного заліза 58–60 % (загальна продуктивність фабрик становить 7 млн т концентрату на рік) надходить на операцію зневоднення. Зневоднення здійснюється на вакуумних фільтрах Ду 100–2,5 (дві установки), які працюють у безперервному режимі з подачею поверхнево-активних реагентів FERRAWET 1471 або FLODRI 470 у кількості 144–158 г/т концентрату.

Продуктивність одного фільтра становить 35 м^3 пульпи за зміну, що дозволяє доводити вологість концентрату до 8–10 %. У середньому за добу кожна фільтрувальна секція виробляє близько 3 000 т концентрату з кінцевою вологістю не більше 10 %. Після фільтрації продукт транспортується на накопичувальні склади, де сухий концентрат утримується при вологості не вище 10 % для збереження фізичних властивостей під час зберігання та подальшого перевантаження.

Формування партій готового концентрату відбувається за допомогою конвеєрних систем із продуктивністю 1 200 т/год, що дозволяють протягом 24 годин накопичувати до 28 000 т концентрату на складі. Для завантаження залізничних вагонів використовуються лінії вагоноперевантажувачів із пропускною спроможністю 4 500 т/добу; загалом на комбінаті працює три станції завантаження, що забезпечують відвантаження до 8 000 т концентрату на добу.⁶

Усі етапи технологічного процесу контролюються автоматизованими системами управління, які щогодини оновлюють дані про хімічний склад пульпи та концентрату через мережу датчиків рентгенофлуоресцентного та спектрального аналізу, а також контролюють параметри гідродинамічних циклонів і млинів у режимі реального часу.

Загальна питома витрата електроенергії на виробництво однієї т концентрату становить близько 62 кВт·год, з них 3,44 кВт·год припадає на дроблення, 58,8 кВт·год — на подрібнення та класифікацію, і ще 0,876 кВт·год — на процеси збагачення й фільтрації.⁶

1.6 Джерела утворення відходів на підприємстві

Джерела утворення відходів на ПрАТ «ПівдГЗК» охоплюють усі стадії технологічного циклу. По-перше, під час відкритого видобутку руди в кар'єрі – при проведенні бурових робіт та вибухів, а також під час розкриття та навантаження породи – виникають забруднені стічні води й пил, що утворюються від руху та роботи кар'єрної техніки. По-друге, під час транспортування видобутої руди автотранспортом до дробильних цехів випадає пил із кузовів самоскидів та

відбуваються викиди від двигунів рухомого складу.

Третім джерелом є операції чотириступеневого дроблення: на горизонтальних щоккових дробарках типу ККД 1500/180, конусних дробарках КСД 2200 і КМД 2200, а також конусних дробарках КРД 900/100, де під час роздроблення породи та взаємного зіткнення металевих елементів створюється тачасто піднімається пил, а частина матеріалів ізношується на поверхні дробильного обладнання.

Далі, під час мокрого трьохступеневого подрібнення в шарових млинах МШЦ $3,6 \times 4,0$, МШЦ $4,5 \times 5,0$ і МШЦ $3,6 \times 5,5$ та при класифікації в двоспіральних гідроциклонах виникають струми пульпи й технологічні води, що потребують циркуляції в замкненій системі та частково спрямовуються до хвостосховища.⁶

Основним джерелом відходів на фабриках є комірки магнітної сепарації: перші чотири низькопольових блоки сепараторів ПБМ 120/300, де відокремлюються найбільш магнетитові мінерали, а потім високопольові сепаратори НЕМ-380 і НЕМ-330, у процесі яких формуються хвости із пониженою магнітною насиченістю та шлами, що додатково обробляються на магнітних дешламаторах МД 12А. Крім того, операція зневоднення концентрату на вакуумних фільтрах Ду 100–2,5 зі введенням реагентів FERRAWET 1471 або FLODRI 470 є джерелом фільтраційного шламу.⁶

1.7 Характеристика відходів на підприємстві

На ПрАТ «ПівдГЗК» щороку формується кілька великих потоків промислових відходів, серед яких найбільшими за обсягами є хвости збагачення та породні відходи. Зі згідно із відкритими даними, комбінат щорічно генерує близько 3–4 млн т сумарних відходів, які накопичуються в відвалах розкривних порід і на хвостосховищах. При цьому саме хвостосховище «Войкове», що експлуатується з 1977 року, має площу 336 га і фактично заповнене на приблизно 19,6 млн м³ матеріалу; проектна місткість дамби дозволяє досягти позначки 163 м над рівнем моря, що забезпечить загальний корисний об'єм сховища близько 29,4 млн м³.

У складі шламів із «Войкового» хвостосховища переважає кварц (приблизно 64,4 %), карбонати (17 %), гідроксиди заліза (5,3 %), силікати (6 %), кальцит (4,2 %),

апатит (0,3 %) та залишкові магнетитові фракції (зокрема магнетит у чистому вигляді – 1,8 %, а сумарно з гематитом – 1,0 %). Через високу вологість (понад 60 %) і тонку дисперсність (частинки менше 0,074 мм) ці хвости мають помітний екологічний вплив на ґрунтові та підґрунтові води, тому успішно функціонуюче хвостосховище «Войкове» разом із «Об'єднаним» (713 га) є ключовим об'єктом утилізації: саме там накопичуються мільйони т відходів збагачення, що формуються під час магнітної сепарації.

Породні відходи, які утворюються при кар'єрних роботах, становлять більшу частину загального обсягу відходів комбінату: це гірські породи з низьким вмістом заліза (менше ніж 15 % Fe) і високим вмістом SiO_2 та Al_2O_3 . Згідно з даними підприємства, у відвалах розкривних порід нині накопичено близько 4 млрд м^3 матеріалу, що переважно складається із кварцово-піскуватих та глинистих порід. Об'єм щорічно видобутої корисної копалини становить приблизно 15–16 млн т, із яких близько 60–70 % (10–11 млн т) становлять породні відходи; ці обсяги мають довгострокові наслідки для ландшафтів та вимагають розміщення відділів на сотнях гектарів.⁷

Породні відходи, маючи низьку вологість (5–10 %), характеризуються середньою питомою щільністю близько $2,5 \text{ г/см}^3$ і складаються здебільшого з кварцитів, пісковиків та глинистих мінералів; ці матеріали розміщуються в спеціальних полігонах та створюють значну техногенну навантаженість на довкілля внаслідок ерозії та пилових викидів під час зберігання.

Окрім гірничо-рудних відходів, у процесі експлуатації дробильних і млинових установок утворюються металеві шлами та знос обладнання. Після проходження через чотири стадії дроблення (щоківі дробарки ККД 1500/180, конусні КСД 2200, КМД 2200 і КРД 900/100) із кожного дрібного блоку на зони футерування та металеві деталі припадає близько 0,5–1 % від обсягу обробленої руди у вигляді абразивного металевих пилу й стружки, який збирається у контейнерах для подальшої утилізації як металобрухт.⁷

У корпусах шарових млинів МШЦ $3,6 \times 4,0$, МШЦ $4,5 \times 5,0$ і МШЦ $3,6 \times 5,5$ зносяться внутрішні футерівки, стінки барабанів та самі металеві кулі: щороку в

результаті цього утворюється близько 200–300 т дрібних металевих шламів, у яких містяться залізо, марганець і оксидні плівки (FeO , Fe_2O_3 , MnO). Після вилучення такі шлами передаються на переробні підприємства чорної металургії, де ймовірний вихід корисних компонентів (зокрема марганцю) дозволяє зменшити обсяг відходів.

1.8 Фізико-хімічні властивості відвальних субстратів АТ ПівдГЗК

Відвали АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» — це техногенні накопичення гірничих відходів (розкривних і вмісних порід), що утворюються в процесі видобутку та первинної переробки залізної руди і розміщуються на спеціально відведених територіях.

Відвали ПівдГЗК розташовані у безпосередній близькості до кар'єру та технологічних ділянок комбінату; основні масиви — розкривні пагорби. Рельєф відвалів часто характеризується крутизною схилів до $\sim 35^\circ$, наявністю багаторівневих насипів і складною морфологією, що утворилась внаслідок поетапного відсіпання матеріалів протягом десятиліть. Хвостосховища мають значні площі (сотні гектарів), високий вміст вологи та тонку дисперсність частинок, що сприяє видаленню дрібних фракцій водою і потенційному міграційному впливу на ґрунтові та підґрунтові води.⁸

З геоморфологічної точки зору відвали розглядаються як позитивні акумулятивні форми техногенного рельєфу антропогенного походження, що мають визначену просторову структуру, значні площі поширення та істотно змінюють природний рельєф території. Їх формування є прямим наслідком інтенсивної гірничо-видобувної діяльності, що зумовлює необхідність подальшого аналізу впливу таких об'єктів на довкілля в контексті функціонування АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат».⁸ На рисунку 1.4 зображено вигляд відвалів Кривбасу за допомогою ГІС-технологій Google Earth.



Рисунок 1.4 – Вигляд відвалів Кривбасу

1.8.1. Мінералогічний склад, гранулометрія та кислотність

Мінералогічні та фізико-хімічні властивості відвальних субстратів АТ «ПівдГЗК» формуються під впливом геологічної будови Криворізького залізрудного басейну та технологічних особливостей видобутку залізистих кварцитів. Відвальні маси характеризуються переважанням первинних кремнеземистих та силікатних мінералів, низькою часткою карбонатних компонентів, підвищеною щільністю, а також значною неоднорідністю гранулометричного складу. Основу мінералогічного складу порід становлять *кварц* (55–62 %), *амфібол-вмісні силікати* (10–14 %), *гематит та магнетит* (від 6 до 10 % залежно від зони кар'єру), *біотит* (3–5 %) та інші *алюмосилікати*. Карбонатні породи, представлені доломітом та кальцитом, у середньому становлять 6–8 %, що є нижчим показником у порівнянні з відвалами підприємств, де рудні тіла залягають у вапнякових товщах (наприклад, на майданчиках Північного ГЗК карбонати сягають 12–15 %).⁸

За результатами лабораторних визначень та порівняльних аналізів між кар'єрами Кривбасу встановлено, що відвальні субстрати АТ «ПівдГЗК» мають підвищену твердість і значну фракційність, оскільки при формуванні відвалів переважають уламки гірської маси діаметром від 40 до 120 мм. Частка дрібнодисперсних фракцій (<1 мм) у матеріалі відвалів становить у середньому 8–

12 %, тоді як у хвостах збагачення частка таких частинок сягає понад 55–70 %. Для порівняння, у відвалах Інгулецького ГЗК дрібні фракції становлять 14–18 %, що пов'язано з іншим типом дроблення та структурою рудної товщі.

Гранулометрична неоднорідність безпосередньо впливає на водопроникність та фільтраційні властивості відвалів. Крупноуламкові горизонти мають високі коефіцієнти фільтрації (3,5–6,8 м/добу), тоді як тонкодисперсні ділянки — суттєво нижчі (0,12–0,35 м/добу). В середньому інтегральний коефіцієнт фільтрації відвального масиву становить 1,1–1,8 м/добу. Така неоднорідність створює умови для нерівномірного розподілу вологи, підвищеної ерозійної чутливості та можливого формування локальних застійних зон.⁸

Кислотність відвалів АТ «ПівдГЗК» визначається вмістом сульфідних мінералів (пірит, халькопірит, піротин), частка яких зазвичай не перевищує 0,2–0,4 %. Через низький вміст сульфідів кислотогенний потенціал порід є обмеженим, тому середній показник кислотності водної витяжки коливається від 6,7 до 7,4, тобто є близьким до нейтрального. Для порівняння, у відвалах Північного ГЗК були зафіксовані значення рН 5,4–6,2 через підвищений вміст піриту в окремих горизонтах.

Збагачення та окиснення гематитових і магнетитових фракцій також впливають на кисло-лужний баланс субстратів. Проте через високий вміст кремнезему (понад 60 %) буферні властивості відвальної маси залишаються слабкими. В умовах природного зволоження та атмосферних впливів показники рН у верхніх шарах відвалів АТ «ПівдГЗК» можуть знижуватися до 6,2–6,5, але суттєвих відхилень у бік кислотності не спостерігається.¹⁰

У таблиці 1.1 зображено порівняльні фізико-хімічні характеристики відвальних порід АТ «ПівдГЗК» та інших підприємств Кривбасу.

Таблиця 1.1 — Порівняльні фізико-хімічні характеристики відвальних порід АТ «ПівдГЗК» та інших підприємств Кривбасу¹⁰

Показник	АТ «ПівдГЗК»	Північний ГЗК	Інгулецький ГЗК
Вміст кварцу, %	55–62	50–58	54–60
Показник	АТ «ПівдГЗК»	Північний ГЗК	Інгулецький ГЗК
Вміст гематиту та магнетиту, %	6–10	8–12	7–11
Карбонатні породи, %	6–8	12–15	9–11
Сульфіді (пірит), %	0,2–0,4	0,4–0,8	0,3–0,5

Закінчення табл. 1.1

Показник	АТ «ПівдГЗК»	Північний ГЗК	Інгулецький ГЗК
Середній рН водної витяжки	6,7–7,4	5,4–6,2	6,2–7,0
Дрібні фракції (<1 мм), %	8–12	10–14	14–18
Коефіцієнт фільтрації, м/добу	1,1–1,8	0,9–1,3	1,4–2,0

Як видно з порівняння, відвали АТ «ПівдГЗК» характеризуються помірною фракційністю та нейтральною кислотністю, що робить їх менш схильними до процесів кислотного дренажу, але водночас ускладнює природне заростання через високу щільність та низький вміст дрібнопиловатих фракцій. Важливою рисою є також низька буферність та слабка здатність до природного структурування, що формує актуальність заходів екологічної рекультивації.

1.8.2. Вміст макро- та мікроелементів, включаючи важкі метали

Хімічний склад відвальних порід та хвостів магнітного збагачення АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» формується під впливом мінералогічних особливостей скелеватських залізистих кварцитів, метаморфізованих сланців, пісковиків та глинистих прошарків, які є основою геологічної будови Криворізького басейну. Важливою характеристикою цих техногенних масивів є значна варіабельність вмісту макро- та мікроелементів, що визначає їх екотоксикологічний потенціал, мобільність металів та можливість подальшого рослинного освоєння територій. Хімічний профіль відвальних субстратів залежить від стадії формування відвалів, ступеня вивітрювання, гідрологічного режиму та частки тонкодисперсної фракції, що значною мірою визначає здатність субстрату акумулювати або, навпаки, мобілізувати елементи, включаючи токсичні метали.¹⁰

За даними ґрунтово-геохімічного моніторингу Криворізького регіону (Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України, Криворізький ботанічний сад НАН України), відвальні породи ПівдГЗК містять значні кількості кремнезему (SiO_2), оксидів заліза, кальцію, магнію, а також підвищені концентрації таких металів, як марганець, ванадій, нікель, мідь, цинк і, меншою мірою, кадмій та

свинець. У хвостах збагачення вміст мінеральних компонентів має чітку спеціалізацію: домінуючі кварцові частинки поєднуються з залишковими магнетитовими та гематитовими фракціями, які після подрібнення до частинок $<0,074$ мм суттєво збільшують питому поверхню та кількість активних сорбційних центрів.¹⁰

У середньому за даними польових та лабораторних досліджень, макроеlementи у відвалах ПівдГЗК представлені такими діоксидними та оксидними формами: SiO_2 у межах 52–66 %, Fe_2O_3 — 15–32 % для порід і 3–7 % у хвостах; Al_2O_3 — 4–8 %, CaO — 2,5–5 %, MgO — 1,3–2,8 %. Особливе значення для екологічної безпеки має співвідношення заліза у формі FeO та Fe_2O_3 , оскільки їх пропорція визначає ступінь окиснення поверхні частинок і, відповідно, їх здатність до сорбції важких металів. Відвальні матеріали, що перебувають у середовищі з високою аерацією, зазвичай містять вищі концентрації тривалентного заліза, що робить їх потенційно сприятливішими для іммобілізації токсикантів.¹⁰

Мікроелементний склад демонструє значну нерівномірність, що зумовлено як природною неоднорідністю порід, так і технологічним дробленням та сепарацією. Найбільші концентрації наявні для марганцю (390–850 мг/кг у породах та до 1100 мг/кг у хвостах), міді (25–48 мг/кг), цинку (35–70 мг/кг), нікелю (14–32 мг/кг) та ванадію (85–160 мг/кг). Слід зазначити, що ванадій є характерним компонентом скелеватських кварцитів і може бути одним із обмежувальних факторів для рослинних угруповань на ранніх етапах сукцесії. Концентрації кадмію та свинцю у відвальних масах ПівдГЗК є порівняно низькими, але не рівномірними: Cd варіює у межах 0,15–0,32 мг/кг, Pb — 6–18 мг/кг. Ці показники не перевищують гранично допустимих концентрацій для техногрунтів, однак у тонкодисперсній фракції хвостів (<40 мкм) рівень свинцю може збільшуватися в 2–3 рази, що пов'язано з поверхневою сорбцією на гідроксидах заліза.¹⁰

У таблиці 1.2 подано узагальнений спектр макро- та мікроelementів у відвальних породах АТ «ПівдГЗК» за середніми даними геохімічних спостережень різних років.¹⁰

Таблиця 1.2 — Узагальнений спектр макро- та мікроелементів у відвальних породах АТ «ПівдГЗК»¹⁰

Показник	Відвальні породи
SiO ₂ , %	52–66
Fe ₂ O ₃ , %	15-32
Al ₂ O ₃ , %	4-8
CaO, %	2.5-5
MgO, %	1,3–2,8
Cu, мг/кг	25–48
Zn, мг/кг	35–70
Pb, мг/кг	6–18
Cd, мг/кг	0,15–0,32

Техноземи відвалів Кривбасу характеризуються нерівномірним розподілом елементів і підвищеним умістом Mn, Zn, Cu та Cd у дрібнодисперсних фракціях, що мають найбільшу сорбційну здатність. Аналогічна тенденція спостерігається у відвальних породах ПівдГЗК, де валові концентрації металів здебільшого відповідають природному фону, але дрібні частинки потенційно здатні до мобілізації мікроелементів у змінних умовах середовища, що є важливим для оцінки ризиків і планування рекультивації.

1.9 Екологічний вплив техногенних відвалів ПівдГЗК на довкілля

1.9.1. Вплив на ґрунти, воду та рослинний покрив

Накопичення відвальних мас після технологічних процесів на АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» суттєво трансформує природні ландшафти, змінюючи властивості ґрунтів, поверхневих і підземних вод, а також рослинних угруповань. Розміщення у відвалах понад 4 млрд м³ пустих порід, сформованих у результаті переробки магнетитових кварцитів Скелеватського родовища, призвело до повного знищення природного ґрунтового покриву на площах, що сумарно перевищують 70 км².

На поверхні таких техногенних масивів домінує щільний субстрат зі слабо розвиненою структурою та низькою водоутримувальною здатністю: вона у 3–4 рази нижча, ніж у чорноземів Криворізької тераси. Це обумовлює високий рівень поверхневого стоку, підвищену ерозію та накопичення пилових фракцій у пониженнях рельєфу.¹¹

За гранулометрією відвальні породи мають переважно крупноуламкову та щебенисту структуру, однак окремі ділянки містять 8–12 % дрібнодисперсної фракції <0,1 мм. Саме ці частинки формують основний екологічний ризик, оскільки вони здатні акумулювати мікроелементи та важкі метали. За даними комплексних геохімічних досліджень Кривбасу, вміст Fe_2O_3 у тонких фракціях відвалів може сягати 25–35 %, MnO — 0,2–0,4 %, а концентрації Zn і Pb варіюють у межах природного фону, але підвищуються у вологих мікророзонах. Відвали ПівдГЗК мають схожу закономірність: аналізи техноземів поблизу зон активного нагромадження пилу показують збільшення Mn до 520–610 мг/кг, Zn до 70–95 мг/кг, що дещо вище середнього фону для регіону (60–80 мг/кг). Однак навіть такі концентрації можуть бути потенційно рухомими у кислому середовищі.¹¹

Формування слабокислої реакції середовища пов'язане з окисненням сульфідних включень у гірських породах. Хоча вміст сульфідів у кварцитах Скелеватського родовища невеликий (зазвичай <0,3 %), цього достатньо для появи локальних зон із рН 5,0–5,5 після інтенсивних опадів, що підтверджується польовими вимірюваннями біля схилів Першотравневого відвалу. За таких умов рухливість Mn , Zn , Cu та частково Ni зростає у 1,5–3 рази, що створює ризики міграції цих елементів у ґрунтові та підземні води.¹²

Водне середовище зазнає впливу передусім через дистанційний поверхневий стік. Інтенсивні зливи сприяють перенесенню дрібнодисперсних частинок відвального матеріалу у балки та неорганізовані водоприймачі. За даними «Українського наукового центру екології ґрунтів», саме завислі частинки становлять основний потік міграції металів із техногенних формувань. У межах ПівдГЗК періодично реєструються підвищені концентрації заліза у дренажних водах, що відходять від північного масиву відвалів: у весняний період загальний Fe у

фільтратах становив 2,8–3,6 мг/дм³, що перевищує природний рівень у ґрунтових водах Криворізького регіону (0,3–1,0 мг/дм³). Концентрації марганцю фіксувалися на рівні 0,15–0,22 мг/дм³, що також вказує на вплив техногенного субстрату.¹²

Розповсюдження пилу з відвалів — один із найбільш виражених процесів впливу на прилеглі ґрунти та рослинність. У сухий період року схили відвалів здатні продукувати до 5–12 т/га на рік пилу. Частинки діаметром менше 10 мкм переносяться на відстань понад 5–7 км, особливо за пануючих північно-східних вітрів. У такому пилу переважають SiO₂ та Fe₂O₃, також у тонких фракціях виявляються підвищені концентрації Mn і Zn, що сприяє вторинному забрудненню поверхневих ґрунтів промислової зони міста.

Рослинний покрив відвалів відзначається низьким ступенем сформованості та видовим бідністю. На техногенних субстратах Криворіжжя домінують полин, щиріця, осока рання та окремі інтродуценти, характерні для бідних ґрунтів. На відвалах ПівдГЗК помітні перші ознаки природної сукцесії — локальне поширення мохів, лишайників та окремих деревних видів (робінія, гледичія), що свідчить про початок процесів ґрунтоутворення.

Особливу роль відіграє лишайникова флора: на відвалах комбінату ідентифіковано щонайменше 10 видів лишайників, серед яких *Aspicilia cinerea*, *Candelariella aurella* та *Lecanora dispersa*. Вони виступають природними біоіндикаторами стабільності субстрату та відображають рівень важких металів у поверхневому шарі порід.¹³

Незважаючи на те, що валові концентрації більшості токсичних металів у відвалах ПівдГЗК загалом не виходять за межі природного фону, екологічні ризики визначаються їх рухомими формами. Дрібні фракції, висока пористість поверхневого шару й динамічні зміни рН створюють передумови для міграції Zn, Mn та Fe у біосферу.

1.9.2. Потенційні ризики для здоров'я людини та біорізноманіття

Накопичення відвальних порід створює кілька шляхів поширення шкідливих речовин у довкіллі, що може впливати на здоров'я людей і стан місцевих екосистем. Головні шляхи — інгаляційний (пил), пероральний (контамінація ґрунтів і харчової продукції) та через питну воду (інфільтрація і забруднення підземних вод). Дрібнодисперсні фракції відвалів ($<10\text{ }\mu\text{m}$ і $<2,5\text{ }\mu\text{m}$) мають найбільший ризик інгаляційного проникнення в дихальні шляхи, що підтверджено світовими рекомендаціями щодо впливу частинок на здоров'я населення. Епідеміологічні й токсикологічні дослідження пов'язують тривале опромінення аерозолями $\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{10}$ з підвищеною частотою серцево-судинних і респіраторних захворювань; саме промислові джерела пилу (включно з кар'єрами та відвалами) є значимим локальним внеском у ці показники.

Хімічно активні компоненти відвалів (зокрема Mn, Zn, Cu, Pb, Cd та рухомі форми Fe) акумулюються переважно у тонкодисперсних частках і на гідроксидних поверхнях оксидів заліза; за змін pH та окисно-відновного стану ці елементи можуть переходити у розчинні форми і мігрувати в ґрунтово-водні потоки. У районах із присутністю сульфідів випадкове локальне підкислення водних фільтратів значно підвищує мобільність згаданих металів, що описано в оглядах з проблем кислотних стоків і міграції металів.¹⁴

Для Криворізького регіону і зокрема для масивів ПівдГЗК місцеві дослідження показують: концентрації багатьох металів у відвальних породах близькі до геохімічного фону, проте дрібні фракції містять помітно вищі частки Mn, Zn, Cu і Cd, що підвищує їхню екологічну значущість. Польові заміри фільтратів і зонального пилу на ділянках навколо відвалів Кривбасу виявляли підвищення рухомих форм металів у кілька разів у порівнянні з фоновими значеннями; ці дані документовано у регіональних дослідженнях.

Екологічні наслідки для біорізноманіття простежуються через прямі і непрямі механізми: токсичний вплив металів на рослини (пригнічення росту, порушення фотосинтезу), зменшення чисельності ґрунтових безхребетних (що впливає на

грунтотвірні процеси), а також зниження трофічної доступності середовища для дрібних хребетних. Багато досліджень демонструють, що накопичення металів у листі і коренях культурних і дикорослих рослин підвищує ризик потрапляння токсикантів у ланцюги живлення і може зумовлювати довгострокові біоаккумуляційні ефекти.¹⁴

1.10 Аналіз технології утилізації відходів на підприємстві

На ПрАТ «ПівдГЗК» наявна базова інфраструктура для утилізації основних видів відходів: шлами хвостосховищ обробляють у спеціальних відстійниках, де їхній вміст твердих часток частково осідає й вода частково повертається в технологічний цикл збагачувальних фабрик.

Наявність великих відвалів розкривних порід і хвостосховищ на «ПівдГЗК» породжує низку фундаментальних проблем, які остаточно не розв'язані навіть із чинними технологіями утилізації. По-перше, відвали розкривних порід займають сотні гектарів родючих земель та прилеглих територій, що призводить до деградації ландшафту й втрати сільськогосподарського потенціалу. Щорічно на комбінаті формується близько 10–11 млн т породних матеріалів, які мають фракцію від кількох сантиметрів до глини, мають низький вміст заліза (менше 15 % Fe) та переважно складаються з SiO_2 і Al_2O_3 . Ці породи розміщують у відкритих відвалах без спеціальних заходів для стабілізації бокових схилів, тому зони схилів регулярно зазнають ерозії: після сильних дощів з частотою понад 20 мм/год поверховий шар розмивається, що утворює глибокі борозни й вимиває пил із дрібнодисперсних часток глини. Вітер «підіймає» ці фракції під час посухи, створюючи великі хмари пилу, які вкривають усе навколо тонким шаром мулу — так утворюються пилові осідання на полях і дорогах у радіусі кількох кілометрів.¹⁵

Хвостосховища «Войкове» й «Об'єднане» протягом десятиліть накопичують понад 30 млн м³ шламів із масовою часткою дрібнодисперсних часток (< 0,074 мм) та вологістю понад 60 %. У практичному вимірі це означає, що при найменшому порушенні ущільнення або у випадку різкого підвищення рівня фільтраційних вод

дамба може почати просідати. Саме через нерегулярне технічне обслуговування шламових насосів у 2024 році два рази траплялися аварійні підпірні відпливи, коли близько 200 м³ неприйнятої пульпи зливалася до нижнього кармана під дамбою.

Це створює ризик руйнування берегових укосів і подальшого забруднення ґрунтів залишками магнетиту й глини. Через поступове накопичення шарів хвостів відбувається постійне підняття дамби, але без належного виконання дренажних робіт відбувається інфільтрація техногенно забрудненої води в підземні горизонти.

Із цих причин можна стверджувати, що формальні наявні інженерні рішення для утилізації відходів на «ПівдГЗК» не дають змоги уникнути системних проблем: великі відвали займають цілі райони, хвостосховища працюють у рамці «невизначеного балансу» між накопиченням і дренажем. З огляду на це, доцільно розглянути додаткові заходи у наступному розділі.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЙ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ПОРУШЕНИХ ЗЕМЕЛЬ АТ «ПІВДЕННИЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ КОМБІНАТ»

2.1 Сутність рекультивації порушених земель та її значення

Рекультивація порушених земель є комплексом цілеспрямованих заходів, спрямованих на відновлення або формування нових функціонально придатних ландшафтів на територіях, порушених унаслідок гірничо-видобувної та іншої промислової діяльності. Термін «рекультивація» походить від латинських слів *re* — відновлення та *cultus* — обробіток, що відображає його основний зміст як процес повторного залучення порушених земель до господарського використання. Активне поширення поняття рекультивації пов'язане з розвитком відкритого способу видобування корисних копалин, який супроводжується значними трансформаціями природного рельєфу та ґрунтового покриву.

У науковій літературі рекультивація трактується не лише як відновлення родючості ґрунтів, а як комплексний процес поліпшення техногенно змінених територій, що охоплює відновлення біотичних і абіотичних компонентів ландшафту. Відповідно до сучасних підходів, об'єктом рекультивації є не окремі ґрунти чи гірські породи, а порушені землі загалом, незалежно від ступеня збереженості природного ґрунтового профілю. Такий підхід дозволяє розглядати рекультивацію як важливий інструмент оптимізації техногенних ландшафтів і покращення екологічного стану територій.¹⁶

Практична реалізація рекультиваційних заходів, як правило, здійснюється поетапно. Першим є підготовчий (проектно-аналітичний) етап, який передбачає обстеження порушених земель, аналіз природних умов району, вивчення властивостей розкритих порід і визначення їх придатності до подальшого використання, а також обґрунтування напрямів і методів рекультивації. На цьому

етапі формується концепція відновлення територій і розробляється проєктна документація.

Наступним є гірничотехнічний етап, що полягає у формуванні стабільного техногенного рельєфу та підготовці поверхні земель до подальшого використання. Він включає селективне знімання і складування порід, планування поверхні, формування відвалів, нанесення потенційно родючих матеріалів, а також виконання протиерозійних і меліоративних заходів. Зазначені роботи зазвичай здійснюються підприємствами, які проводили гірничі розробки.

Завершальним є біологічний етап рекультивації, спрямований на відновлення екологічних функцій територій шляхом формування рослинного покриву та поліпшення властивостей субстрату. Реалізація цього етапу забезпечує стабілізацію поверхні, зменшення негативного впливу техногенних утворень на довкілля та створення передумов для подальшого цільового використання земель. Вибір напряму рекультивації здійснюється з урахуванням природно-кліматичних умов, властивостей порід, ступеня порушення земель і соціально-економічних потреб регіону. Найбільш поширеними є сільськогосподарський, лісгосподарський, водогосподарський, рекреаційний, санітарно-гігієнічний та будівельний напрями. Усі вони мають на меті формування екологічно збалансованих і функціонально доцільних ландшафтів, що забезпечують довгострокове використання рекультивованих територій без негативного впливу на довкілля.¹⁶

2.2 Нормативно-правові вимоги до рекультивації в Україні

В Україні рекультивація порушених земель є предметом правового регулювання у системі земельних та екологічних відносин і базується на положеннях чинного законодавства, яке визначає загальні принципи охорони земель, правовий статус земельних ресурсів та обов'язки землекористувачів щодо відновлення порушених територій у зв'язку з господарською діяльністю.

Основним законодавчим актом, що закладає правову основу рекультивації, є Земельний кодекс України, який у статті 166 дає визначення рекультивації

порушених земель. Згідно з цим положенням, рекультивація розглядається як комплекс організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, поліпшення стану та продуктивності земель, які були змінені внаслідок різних видів робіт, у тому числі гірничо-видобувних, геологорозвідувальних і будівельних. Об'єктами рекультивації визнаються землі, що зазнали змін у структурі рельєфу, екологічному стані ґрунтів, материнських породах чи гідрологічному режимі внаслідок господарської діяльності.¹⁷

Правове регулювання рекультивації доповнюється положеннями Закону України «Про охорону земель», який встановлює загальні засади охорони земельних ресурсів, механізми їх відновлення та збереження родючості. Цей закон закріплює обов'язок землекористувачів забезпечувати раціональне використання земель, їх захист від деградації та реалізувати заходи щодо відновлення порушених територій у разі таких порушень.¹⁷

Рекультивація також регламентується галузевими підзаконними документами, що деталізують порядок проведення робіт, зміст проєктної документації та вимоги до виконання окремих заходів. Так, нормативні акти передбачають розроблення робочих проєктів землеустрою для рекультивації, які містять економічні, проєктні й технічні рішення з відновлення земель, включно з процедурами зняття, складування, збереження й нанесення ґрунтової маси на порушені ділянки у спосіб, що забезпечує їх максимальну продуктивність.¹⁸

Національні стандарти також відіграють важливу роль у правовому забезпеченні рекультивації. Вони визначають вимоги до якості ґрунту й рекультиваційних робіт на ділянках, пошкоджених як відкритим, так і підземним видобутком корисних копалин, геологорозвідувальними або будівельними роботами, та встановлюють орієнтири для проєктування й виконання рекультиваційних заходів незалежно від виду техногенного впливу.

Законодавче регулювання також передбачає окремі інструменти для контролю якості рекультиваційних робіт і моніторингу стану земельних ресурсів. Нормативи у галузі охорони земель та відтворення родючості ґрунтів, які встановлюються Кабінетом Міністрів України, включають вимоги щодо якості ґрунтів, гранично

допустимого антропогенного навантаження, показників деградації та допустимого забруднення, що дозволяє оцінювати ефективність рекультивації та визначати межі допустимого впливу на довкілля під час виробничої діяльності.

Законодавчі положення щодо рекультивації тісно пов'язані з іншими нормативними вимогами, зокрема у сфері оцінки впливу на довкілля (ОВД), що встановлюється окремим законом України. Цей правовий механізм вимагає, щоб під час планування діяльності, здатної мати значний вплив на довкілля (включно з гірничо-видобувними проєктами), оцінка екологічних наслідків передбачала заходи з рекультивації та моніторинг їх ефективності.¹⁸

Системна відповідальність за дотримання вимог земельного законодавства, до яких належить і проведення рекультивації, передбачена нормами відповідальності за порушення земельного законодавства, що включають цивільну, адміністративну чи кримінальну відповідальність для фізичних та юридичних осіб у разі невиконання встановлених правових вимог.

2.3 Класифікація та оцінка придатності техногенних порід для рекультивації

У процесі гірничо-видобувної діяльності формуються різноманітні за походженням і властивостями техногенні породи, які істотно відрізняються за фізичними, хімічними та біологічними характеристиками. Саме ці відмінності визначають можливість і доцільність їх подальшого використання в процесі рекультивації порушених земель. Тому попередня класифікація техногенних порід за придатністю до відновлення є обов'язковою умовою планування рекультиваційних заходів.

Узагальнення наукових досліджень і практичного досвіду дозволяє виділити кілька основних груп техногенних порід залежно від їх потенціалу для формування екологічно стійких поверхонь. Придатні та потенційно родючі породи характеризуються відносно сприятливим гранулометричним складом, нейтральною або слабокислою реакцією середовища, достатньою водопроникністю та

відсутністю токсичних компонентів у концентраціях, небезпечних для рослин. До цієї групи, як правило, належать лесоподібні суглинки, супіски та окремі різновиди глинистих порід. За умови мінімального агротехнічного поліпшення такі породи можуть бути використані для біологічної рекультивації.¹⁹

Малопридатні або умовно придатні породи мають обмежений потенціал для самостійного відновлення рослинного покриву. Вони часто відзначаються низьким вмістом поживних елементів, несприятливою кислотністю, ущільненою структурою або недостатньою вологоємністю. Використання таких порід у рекультивації можливе лише за умови проведення комплексу технічних і агрохімічних заходів, зокрема нанесення родючого шару ґрунту, внесення органічних і мінеральних добавок, залуження або створення штучного ґрунтоподібного покриву.¹⁹

Окрему групу становлять непридатні та фітотоксичні породи, які характеризуються високою концентрацією солей, важких металів, різко кислою або лужною реакцією середовища, а також несприятливими фізичними властивостями. Такі породи практично не забезпечують умов для росту рослин і можуть становити додаткову екологічну небезпеку. У практиці рекультивації їх зазвичай використовують як конструктивну основу відвалів або ізолюють від біологічно активних шарів шляхом перекриття більш сприятливими матеріалами.²⁰

Оцінка придатності техногенних порід здійснюється з урахуванням комплексу показників, серед яких ключове значення мають гранулометричний склад, кислотність середовища, вміст водорозчинних солей, поживних елементів та потенційно токсичних компонентів. Важливим є також урахування інженерно-геологічних умов і майбутнього напрямку використання рекультивованих земель.

2.4 Основні принципи вибору напрямку та виду рекультивації порушених земель

Рациональне використання земель, порушених унаслідок гірничо-видобувної діяльності, можливе лише за умови обґрунтованого вибору напрямку та виду рекультивації. Практика рекультиваційних робіт у різних країнах свідчить, що

універсальних рішень у цьому питанні не існує, а ефективність відновлення територій визначається комплексом природних, технічних та соціально-економічних чинників.

До ключових факторів, які необхідно враховувати при виборі напрямку рекультивації, належать географічне розташування порушених земель, ґрунтово-кліматичні умови регіону, рівень господарського освоєння території, потреби місцевого населення, а також фізико-хімічні та інженерно-геологічні властивості техногенних порід. Важливу роль відіграють економічні аспекти, зокрема витрати на рекультиваційні роботи та доцільність подальшого використання відновлених земель.

Обґрунтування напрямку рекультивації неможливе без всебічного аналізу техногенних змін, що виникають у процесі розробки родовищ. Особливу увагу приділяють характеристиці техногенного рельєфу, стабільності сформованих відвалів, умовам зволоження та можливості їх подальшого функціонального використання. На основі технічної та економічної оцінки визначається доцільність реалізації того чи іншого напрямку рекультивації або встановлюється її економічна недоцільність.²¹

У разі підтвердження економічної доцільності рекультиваційних робіт можливе планування як технічної рекультивації з подальшим будівельним використанням територій, так і біологічної рекультивації з орієнтацією на сільськогосподарський, лісгосподарський, водогосподарський, рекреаційний або рибогосподарський напрями. Якщо ж техніко-економічна оцінка свідчить про недоцільність повноцінного відновлення земель, першочерговим завданням стає зменшення негативного впливу порушених територій на довкілля, що зумовлює вибір санітарно-гігієнічного напрямку рекультивації або консервації.²¹

Вибір конкретного напрямку рекультивації також тісно пов'язаний з гірничо-геологічними умовами родовища та способом видобування корисних копалин. У регіонах з високою щільністю населення та розвиненим сільським господарством доцільно надавати перевагу відновленню земель для аграрного використання або рекреаційних потреб. Водночас у промислово навантажених районах важливого

значення набувають заходи санітарно-гігієнічного характеру, спрямовані на мінімізацію екологічних ризиків.

Слід враховувати й динамічний характер техногенних утворень. У процесі формування та подальшого існування відвалів під впливом механічних, фізико-хімічних і біогенних процесів відбувається зміна властивостей порід. Уже в перші роки після їх утворення спостерігається перерозподіл дрібнозему, акумуляція вологи в понижених ділянках, зміна гранулометричного складу та реакції середовища. На старіших відвалах ці процеси можуть сприяти поступовому формуванню кореневмісного шару, що розглядається як початковий етап ґрунтоутворення.²²

Комплексне врахування зазначених факторів дозволяє диференціювати порушені території за доцільністю проведення рекультивації, обґрунтувати вибір її напрямку та адаптувати відновлювальні заходи до реальних природних і техногенних умов.

2.5 Напрями рекультивації порушених земель

Рекультивація порушених земель передбачає вибір і реалізацію комплексу взаємопов'язаних заходів, спрямованих на відновлення фізичних, хімічних і біологічних властивостей ґрунтового покриву, а також створення умов для подальшого функціонального використання територій, які зазнали техногенного впливу внаслідок гірничо-видобувної діяльності. Напрямок рекультивації визначається природно-кліматичними умовами регіону, характеристиками техногенних порід, соціально-економічними потребами та екологічними обмеженнями.

Сільськогосподарський напрям рекультивації полягає у відновленні продуктивності земель для ведення сільськогосподарського використання. Він реалізується шляхом формування родючого або потенційно родючого шару ґрунту, проведення агротехнічних заходів, внесення органічних і мінеральних добрив та вирощування культур, адаптованих до місцевих ґрунтово-кліматичних умов. Такий напрям є доцільним у регіонах з розвиненим аграрним сектором та за умови невисокого рівня деградації ґрунтів.²³

Лісогосподарський напрям передбачає створення лісових або чагарникових насаджень на порушених землях з метою стабілізації ґрунтів, зменшення ерозійних процесів і відновлення екосистемних функцій територій. Він є ефективним у зонах з достатнім зволоженням і використовується переважно на ділянках, непридатних для інтенсивного сільськогосподарського використання.²³

Водогосподарський та рибогосподарський напрями ґрунтуються на формуванні водних об'єктів на місці кар'єрних виїмок або понижених елементів техногенного рельєфу. Такі напрями дозволяють створювати ставки, водойми чи водосховища, що використовуються для регулювання водного режиму, господарських потреб або розвитку рибного господарства, а також сприяють формуванню нових водних екосистем.

Рекреаційний напрям рекультивації спрямований на створення територій для відпочинку, туризму та оздоровлення населення. Він реалізується шляхом ландшафтного планування, озеленення, облаштування рекреаційної інфраструктури та забезпечення безпечних умов перебування людей. Такий напрям доцільний на територіях, що розташовані поблизу населених пунктів або мають потенціал для соціального використання.

Санітарно-гігієнічний напрям застосовується у випадках, коли господарське використання рекультивованих земель є обмеженим або економічно недоцільним. Основною його метою є мінімізація негативного впливу порушених територій на довкілля та здоров'я населення шляхом стабілізації відвалів, зниження пиловиділення, ізоляції потенційно небезпечних порід і створення захисних або буферних зон.²⁴

Будівельний напрям рекультивації передбачає підготовку порушених земель до подальшого використання під забудову об'єктів промислової, транспортної, інженерної чи соціальної інфраструктури. Він включає комплекс інженерно-геодезичних і планувальних робіт, спрямованих на забезпечення стійкості ґрунтів, відповідність технічним вимогам і безпечну експлуатацію територій.²⁴

Комбіновані напрями рекультивації базуються на поєднанні кількох підходів у межах однієї території, що дозволяє досягти комплексного ефекту відновлення

земель. Вони застосовуються у випадках, коли функціональне призначення рекультивованих земель передбачає одночасне вирішення екологічних, господарських і соціальних завдань, забезпечуючи раціональне використання територій і підвищення їх екологічної цінності.

У таблиці 2.1 наведено узагальнену характеристику напрямів рекультивації порушених земель.

Таблиця 2.1 — Характеристика напрямів рекультивації порушених земель

Напрямок рекультивації	Основна мета	Характерні заходи
Сільськогосподарський	Відновлення продуктивності земель	Формування родючого шару, агротехнічна обробка, внесення добрив
Лісгосподарський	Стабілізація ґрунтів та відновлення екосистем	Посадка дерев і чагарників, протиерозійні заходи
Водогосподарський	Формування водних об'єктів	Планування рельєфу, гідротехнічні споруди
Рибогосподарський	Господарське використання водойм	Створення ставків, зариблення
Рекреаційний	Соціальне та оздоровче використання	Озеленення, благоустрій, рекреаційна інфраструктура
Санітарно-гігієнічний	Зменшення екологічних ризиків	Стабілізація відвалів, ізоляція небезпечних порід
Будівельний	Підготовка територій під забудову	Планування, інженерно-геологічні роботи
Комбінований	Комплексне використання територій	Поєднання кількох напрямів рекультивації

2.6 Методи технічної рекультивації

Технічна рекультивація є початковим і обов'язковим етапом відновлення порушених земель у гірничо-видобувній промисловості та спрямована на створення інженерно стабільної та екологічно безпечної основи для подальшого біологічного відновлення або іншого функціонального використання територій. Вона охоплює комплекс гірничотехнічних, інженерно-будівельних і меліоративних заходів, які

забезпечують формування сприятливого рельєфу, стабілізацію техногенних утворень і зменшення негативного впливу на довкілля.

2.6.1 Грубе планування та виположування схилів

Відвали гірничо-видобувних підприємств являють собою техногенні насипи розкривних і вмісних порід, сформовані в процесі відкритого або комбінованого видобування корисних копалин. Для таких об'єктів характерна складна морфологія поверхні, наявність конусів насипу, гребенів, локальних западин і значних перепадів висот, а також круті схили, кут укосу яких у ряді випадків може досягати 35–40°. Поєднання крутизни схилів, неоднорідного гранулометричного складу порід і слабкої зв'язаності частинок зумовлює підвищену небезпеку розвитку геодинамічних процесів, зокрема осипів, зсувів і активної водної ерозії, що створює ризики для довкілля та унеможливорює безпечне подальше використання території.²⁵

Грубе планування та виположування схилів є базовим етапом технічної рекультивації відвалів, метою якого є переформування техногенного рельєфу до інженерно стабільного та технологічно придатного стану. Сутність методу полягає у механізованому переміщенні значних обсягів породи з підвищених елементів мікрорельєфу у понижені ділянки з метою вирівнювання поверхні, ліквідації різких перепадів висот і зменшення крутизни укосів до нормативно безпечних значень. Для виконання таких робіт використовують важку землерийну і гірничу техніку, зокрема бульдозери, скрепери, екскаватори, драглайни та допоміжний транспорт, вибір яких визначається геометричними параметрами відвалу, властивостями порід і логістичними умовами ділянки.²⁵

Технологічний процес грубого планування включає кілька взаємопов'язаних стадій. На початковому етапі здійснюють підготовку ділянки, що передбачає оцінювання геометрії відвалу, визначення найбільш нестійких зон, організацію технологічних під'їздів і зон маневрування техніки. Особлива увага приділяється ділянкам з тріщинуватими або розрідженими породами, де можливі локальні обвали або осідання під час переміщення мас породи.

Наступною стадією є зрізання піків і гребенів відвалу. Зрізання виконується пошарово, з поступовим зниженням висоти конусів насипу та формуванням платоподібної або слабохвилястої поверхні. Отриманий матеріал використовується для засипання западин і вирівнювання нижніх частин схилів, що сприяє перерозподілу навантажень у тілі відвалу та підвищенню його стійкості. При цьому уникають різкого підрізання схилів, яке може спричинити втрату рівноваги порід і ініціювати зсувні процеси.²⁶

Ключовим результатом грубого планування є виположування схилів, тобто зменшення кута нахилу укосів до значень, прийнятних для подальшого використання території. Залежно від запланованого напрямку рекультивації та умов експлуатації, кути схилів знижують до 18–20° для лісогосподарського використання або до менших значень для сільськогосподарського напрямку, де необхідна безпечна робота сільськогосподарської техніки та підвищена стійкість поверхні до ерозії. Виположування досягається шляхом подовження профілю схилу з одночасним переміщенням породи з верхніх зон у нижні, що формує більш пологий і передбачуваний геометричний профіль.²⁶

Після формування основної геометрії виконують грубе вирівнювання поверхні та первинне ущільнення порід. Вирівнювання дозволяє зменшити мікронерівності, які можуть концентрувати поверхневий стік і сприяти розвитку ерозії, а первинне ущільнення знижує ризик подальших нерівномірних осідань. Разом з тим ущільнення проводять помірно, оскільки надмірна щільність може негативно вплинути на водопроникність і ускладнити подальшу біологічну рекультивацію.

Грубе планування та виположування схилів виконують не лише інженерну, але й екологічну функцію, оскільки зменшення крутизни схилів і вирівнювання поверхні знижує інтенсивність ерозійних процесів, пиловиділення та неконтрольованого стоку забруднених вод. Крім того, сформований стабільний рельєф створює необхідні передумови для наступних етапів технічної рекультивації, зокрема організації дренажної мережі, протиерозійних заходів, нанесення потенційно родючих порід і реалізації біологічного етапу відновлення.²⁷

2.6.2. Терасування схилів як головний етап технічної рекультивації

Для високих техногенних відвалів гірничо-видобувних підприємств, що мають значну висоту та протяжні схили, одного лише виположування поверхні недостатньо для забезпечення довготривалої інженерної стійкості. Навіть за зменшених кутів укосу такі схили залишаються вразливими до водної ерозії, локальних осипів і формування промоїн, особливо в умовах інтенсивних атмосферних опадів. У зв'язку з цим ключовим методом технічної рекультивації високих відвалів є терасування схилів, яке забезпечує розчленування загального профілю відвалу на окремі стабільні елементи.

Суть методу терасування полягає у формуванні на схилах відвалу системи штучних уступів (терас), які в поперечному розрізі нагадують великомасштабні сходи. Кожна тераса складається з горизонтальної або слабонахиленої полиці та вертикального або похилого міжтерасного укосу.²⁸

На рисунку 2.1 показано принцип терасування схилів відвалу, який застосовується з метою зменшення крутизни укосів, підвищення їх стійкості та запобігання ерозійним процесам.



Рисунок 2.1 — Принцип терасування схилів відвалу

Терасування виконує одночасно кілька функцій: інженерну — за рахунок підвищення стійкості відвалу; протиерозійну — шляхом переривання безперервного стоку води по схилу; технологічну — створення майданчиків для пересування техніки; та екологічну — формування сприятливих умов для подальшої біологічної

рекультивациі. Саме тому цей метод вважається базовим для високих відвалів, незалежно від їх походження та типу порід.

Технологічно терасування здійснюється після завершення грубого планування схилів. За допомогою бульдозерів, екскаваторів і драглайнів на схилі послідовно формують уступи заданої геометрії. Ширина полиць терас, як правило, становить не менше 3–5 метрів, а у ряді випадків може бути збільшена залежно від запланованого напрямку рекультивациі. Така ширина є достатньою для безпечного пересування техніки, виконання доглядових робіт, нанесення ґрунтового або потенційно родючого шару, а також посадки деревно-чагарникової рослинності.²⁹

Важливою конструктивною особливістю терас є формування зворотного ухилу їх поверхні. Полиця тераси проектується з невеликим нахилом (зазвичай 1–2°) у бік тіла відвалу. Це принципове рішення дозволяє спрямувати атмосферні опади не вниз по схилу, де вони могли б розмивати міжтерасні укоси, а вглиб тіла відвалу або до локальних зон інфільтрації. У результаті вода затримується на полиці, поступово всотується в породу або верхній ґрунтовий шар, що знижує інтенсивність поверхневого стоку та ерозійних процесів.

Висота міжтерасних укосів і відстань між терасами визначаються геометрією відвалу, типом порід і загальною висотою схилу. Зазвичай тераси розташовують рівномірно по всій висоті відвалу, що дозволяє уникнути концентрації навантажень у нижніх частинах схилу. При цьому міжтерасні укоси також можуть додатково виположуватися або укріплюватися для підвищення стійкості та зменшення ризику осипів.

Після формування терас виконується їх остаточне вирівнювання та первинне ущільнення поверхні. Це необхідно для забезпечення стабільності полиць і запобігання нерівномірним осіданням у процесі подальшої експлуатації. У той же час надмірне ущільнення уникається, оскільки воно може негативно впливати на водопроникність і створювати несприятливі умови для росту рослин на етапі біологічної рекультивациі.³⁰

З екологічної точки зору терасування значно підвищує ефективність наступних рекультивацийних заходів. Тераси створюють мікрозони зі сприятливішими умовами

зволоження, акумуляції дрібнозему та органічної речовини, що прискорює процес ґрунтоутворення і приживлення рослин. Крім того, на терасах зручно розміщувати протиерозійні елементи, водовідвідні канали, локальні дренажі та захисні насадження.

2.6.3 Нейтралізація кислотності техногенних порід

Однією з характерних проблем техногенних відвалів гірничо-видобувних підприємств є формування підвищеної кислотності порід, що зумовлена їх мінералогічним складом і умовами перебування у відкритому середовищі. Особливо це стосується порід, які містять сульфідні мінерали, зокрема пірит, що при контакті з киснем і водою зазнає окиснення з утворенням сірчаної кислоти. У результаті відбувається закислення порід, зниження показника рН, підвищення рухомості алюмінію, заліза та інших фітотоксичних елементів, що істотно ускладнює подальше ґрунтоутворення і пригнічує розвиток рослинності.³⁰

Хімічна меліорація є важливим етапом технічної рекультивації відвалів, спрямованим на нормалізацію кислотно-лужного стану техногенних порід і створення сприятливих умов для наступної біологічної рекультивації. Суть методу полягає у внесенні хімічних реагентів лужного або нейтралізуючого характеру, які зв'язують надлишкові іони водню та знижують кислотність середовища до рівнів, прийнятних для росту рослин і стабільного функціонування ґрунтових процесів.

Найпоширенішим і технологічно обґрунтованим методом хімічної меліорації є вапнування, що передбачає внесення карбонатних матеріалів кальцію або магнію. Вапнякові матеріали (вапняк, доломіт, крейда, мергель) нейтралізують кислотність, підвищують значення рН, зменшують рухомість фітотоксичного алюмінію та покращують агрохімічні властивості рекультивованих субстратів. Вапнування є особливо ефективним на сильноокислих рекультивованих землях, де без хімічної нейтралізації неможливе формування стійкого рослинного покриву.³⁰

Окрім класичних вапнякових матеріалів, у практиці рекультивації застосовують гіпсування, яке доцільне у випадках, коли поряд із кислотністю спостерігається

надлишок обмінного натрію або погіршення структурних властивостей порід. Гіпс сприяє покращенню агрегатного стану субстрату, підвищує його водопроникність і стабільність, хоча сам по собі не є сильним нейтралізатором кислотності. Тому гіпсування часто поєднують з іншими меліоративними заходами.

Економічно доцільним і екологічно обґрунтованим напрямом хімічної меліорації є використання лужних або слаболужних відходів промисловості, зокрема золи теплових електростанцій, вапнякових або металургійних шламів, цементного пилу та інших кальцієвмісних матеріалів. Такі відходи здатні нейтралізувати кислотність техногенних порід і водночас виконують функцію вторинного ресурсу, що зменшує обсяги захоронення промислових відходів. Використання промислових шламів допускається за умови їх відповідності екологічним вимогам і відсутності перевищень за вмістом токсичних елементів.¹⁵

Технологічно внесення меліорантів здійснюється після стабілізації рельєфу відвалу та завершення основних планувальних робіт. Реагенти рівномірно розподіляють по поверхні терас або вирівняних ділянок із подальшим механічним перемішуванням із верхнім шаром порід. Глибина загортання і дози внесення визначаються ступенем кислотності, буферною здатністю порід і запланованим напрямом рекультивації. Важливо враховувати, що між показником рН і необхідною кількістю меліоранту існує нелінійна залежність, тому надмірне або недостатнє внесення може знизити ефективність заходу.³⁰

Хімічна меліорація виконує не лише нейтралізуючу, а й екологічно стабілізуючу функцію, оскільки зниження кислотності зменшує міграцію важких металів, покращує умови для розвитку мікробіологічних процесів і сприяє формуванню початкових стадій ґрунотворення. У поєднанні з органічними добривами та подальшими біологічними заходами вона істотно підвищує успішність рекультивації техногенних відвалів.

У таблиці 2.2 наведено основні методи хімічної меліорації техногенних відвалів, їх призначення, механізм дії та обмеження застосування.

Таблиця 2.2 — Основні методи хімічної меліорації техногенних відвалів, їх призначення, механізм дії та обмеження застосування

Меліоративний захід	Мета застосування	Основні матеріали	Механізм дії	Переваги	Обмеження
Вапнування	Нейтралізація кислотності	Вапняк, доломіт, крейда	Зв'язування іонів H^+ , підвищення рН	Висока ефективність, доступність	Потребує точного дозування
Гіпсування	Поліпшення фізико-хімічних властивостей	Гіпс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	Покращення структури, водопроникності	Стабілізує субстрат	Слабка нейтралізація рН
Внесення золи ТЕС	Нейтралізація та утилізація відходів	Зола теплових електростанцій	Лужна реакція, збагачення Са	Економічна доцільність	Контроль важких металів
Металургійні шлами	Комплексна меліорація	Доменні та сталеплавильні шлами	Підвищення рН, структуризація	Ресурсозбереження	Змінний склад
Комбіновані методи	Стабільне покращення властивостей	Вапно, зола, органічні добавки	Синергічний меліоративний ефект	Найвища ефективність	Складність реалізації

2.6.4 Екранування, знімання та повторне використання родючого шару ґрунту

Одним із ключових елементів технічної рекультивації порушених земель є збереження та раціональне повторне використання родючого шару ґрунту, оскільки саме він визначає можливість подальшого біологічного відновлення техногенних територій. Родючий шар акумулює основний запас гумусу, макро- і мікроелементів, характеризується сприятливими водно-фізичними та структурними властивостями і

є базовим середовищем для розвитку рослинності. У зв'язку з цим його знімання, окреме складування або безпосереднє повернення на рекультивовані площі розглядається як обов'язкова умова ефективного відновлення земель.

Товщина шару ґрунту, що підлягає знімання, визначається диференційовано з урахуванням будови ґрунтового профілю, рівня родючості та природно-кліматичних умов регіону. Нижня межа родючого шару зазвичай відповідає горизонту з умістом гумусу не менше 1,0–1,5 %, що дозволяє зберегти найбільш цінну частину ґрунтового профілю. У степових регіонах, де ґрунти характеризуються підвищеним вмістом гумусу, знімання шару товщиною близько 25–35 см є технологічно та екологічно обґрунтованим і забезпечує достатній обсяг матеріалу для подальшого нанесення на техногенні субстрати.³¹

У межах зон інтенсивного гірничо-видобувного впливу природний ґрунтовий покрив, як правило, зазнає значної трансформації. Тривала експлуатація родовищ супроводжується деградацією ґрунтів унаслідок пилових випадів, техногенного ущільнення, засолення та механічного змішування з розкритими породами. Тому перед початком рекультиваційних робіт необхідною є попередня оцінка стану збережених фрагментів родючого шару та визначення можливості їх повторного використання. У випадках, коли природний ґрунт суттєво деградований або відсутній, допускається залучення привізних родючих матеріалів або штучно сформованих ґрунтосумішей.

Практика гірничих робіт на багатьох підприємствах свідчить, що значна частина вихідного ґрунтового покриття втрачається, особливо під час формування старих валових відвалів, коли родючий шар не знімався селективно і був перемішаний з розкритими породами. У таких умовах більш сприятливим для подальшої рекультивації є роздільний або роздільно-валовий спосіб складування порід, який дозволяє відокремлювати потенційно родючі горизонти та використовувати їх як підґрунтя для формування рекультиваційного профілю.³²

Процес знімання родючого шару ґрунту передбачає низку послідовних етапів: аналіз матеріалів ґрунтового обстеження та карт, визначення доцільності знімання ґрунту, встановлення конкретної товщини шару, розрахунок обсягів робіт, вибір

місць складування та планування термінів його подальшого використання. За можливості родючий шар доцільно наносити на рекультивовані ділянки без тривалого зберігання, оскільки буртування ґрунту протягом тривалого часу може призводити до втрати гумусу, погіршення структури та зниження мікробіологічної активності.

Після стабілізації рельєфу відвалів і завершення попередніх етапів технічної рекультивації здійснюють екранування та формування штучного ґрунтового профілю. На техногенну основу наносять екрануючий шар із суглинків або глин товщиною, як правило, 30–50 см, який виконує водоутримувальну та захисну функції. Цей шар зменшує інфільтрацію води вглиб відвалу, обмежує контакт кореневої системи з потенційно фітотоксичними породами та створює сприятливі умови для накопичення вологи.³²

Зверху екрануючого шару наносять родючий ґрунт або ґрунтосуміш аналогічної товщини, що формує кореневмісний горизонт. Для цього використовують знятий раніше гумусовий шар або штучні суміші на основі торфу, піску та мінеральних добрив. Нанесення здійснюють рівномірно, з мінімальним ущільненням і без змішування з підстилаючими породами, що дозволяє зберегти агрофізичні властивості ґрунту та забезпечити умови для розвитку рослинності.

2.7. Біологічний етап та основні біологічні методи рекультивації порушених земель

Цей етап настає після завершення інженерних робіт. Його мета — відновити родючість, запобігти ерозії та покращити екологічний стан.

2.7.1 Загальні вимоги та завдання біологічного етапу рекультивації

Завершальним етапом відновлення порушених унаслідок гірничо-видобувної діяльності земель є біологічна рекультивація, яка спрямована на відновлення родючості ґрунтів і формування стабільного рослинного покриву. У науковій

літературі біологічну рекультивацію розглядають як комплекс біологічних та агротехнічних заходів, що забезпечують створення умов для вирощування сільськогосподарських або лісових культур на техногенно порушених територіях та їх подальше залучення до господарського використання.³³

Основними видами біологічної рекультивації є сільськогосподарська та лісгосподарська. Сільськогосподарська рекультивація передбачає вирощування на рекультивованих землях сільськогосподарських культур із подальшим використанням цих територій як орних земель, кормових угідь або інших видів агроландшафтів. Лісгосподарська рекультивація орієнтована на створення деревно-чагарникових насаджень, які можуть виконувати виробничі, санітарно-гігієнічні, рекреаційні або природоохоронні функції, зокрема формування захисних зелених зон та елементів ландшафтної інфраструктури.

Вибір напряму біологічної рекультивації здійснюється на основі комплексного аналізу природних, економічних і соціально-економічних умов території. До визначальних факторів належать цільове призначення земель, їх вартість, географічне положення, рівень антропогенного навантаження, перспективи розвитку сільського або лісового господарства, а також фізико-географічні особливості регіону. Особливої уваги потребують землі, потенційно придатні для сільськогосподарського використання, оскільки вони мають найбільшу господарську цінність і вимагають підвищеної якості підготовки.³³

Для забезпечення ефективної біологічної рекультивації необхідним є формування повноцінного кореневмісного шару. За рекомендаціями наукових досліджень, при сільськогосподарській рекультивації його товщина повинна бути значною, що дозволяє забезпечити оптимальні умови для розвитку кореневої системи рослин. Агрофізичні та агрохімічні властивості такого шару мають відповідати вимогам до щільності, вмісту гумусу, сольового складу та кислотнo-лужного режиму. Для лісової рекультивації допустимий нижчий рівень гумусу, однак показники кислотності та засоленості повинні залишатися в межах, сприятливих для росту деревних порід.

Підбір рослин для біологічної рекультивації рекомендується здійснювати з урахуванням місцевих природних умов. Перевагу доцільно надавати культурам, які вирощувалися на цих землях до початку гірничих робіт або є типовими для прилеглих територій. У разі прогнозованого осідання порід на рекультивованих відвалах у перші роки доцільно уникати висівання багаторічних культур, замінюючи їх однорічними злаково-бобовими сумішками, що краще адаптуються до нестабільних умов і сприяють початковому поліпшенню ґрунтових властивостей.

Важливим завданням біологічної рекультивації є скорочення часу між вилученням земель із господарського використання та їх повторним залученням до продуктивного обороту. На практиці цей період нерідко затягується, що знижує економічну ефективність рекультиваційних заходів і погіршує екологічний стан територій. Тривалість біологічного етапу може становити понад десять років і залежить від швидкості накопичення гумусу та поживних речовин у новоствореному ґрунтовому шарі.³⁴

Слід враховувати, що землі після завершення технічного етапу рекультивації характеризуються низькою стійкістю до водної та вітрової ерозії. У зв'язку з цим перед початком або одночасно з біологічною рекультивацією необхідно передбачати комплекс протиерозійних заходів, спрямованих на збереження сформованого ґрунтового шару та стабілізацію поверхні.

Біологічна рекультивація має значення не лише з точки зору повернення земель до сільськогосподарського чи лісогосподарського використання, але й як елемент формування екологічно збалансованих ландшафтів, що мають природну, економічну та естетичну цінність. У процесі її реалізації можливі відхилення від початкових проектних рішень, що потребує своєчасного коригування заходів на основі науково обґрунтованих підходів.

2.7.2. Природне заростання відвальних ландшафтів як біологічний метод рекультивації

Одним із біологічних механізмів відновлення порушених земель є природне заростання кар'єрно-відвальних ландшафтів, яке відбувається без цілеспрямованого втручання людини. Дослідження, проведені в різних ґрунтово-кліматичних зонах України, свідчать, що цей процес характеризується повільними темпами, що зумовлено бідністю розкривних порід на гумус і поживні елементи, а також їх несприятливими водно-фізичними властивостями.

Винесення глибинних порід на денну поверхню призводить до істотної трансформації гідрологічного режиму та формування складного техногенного рельєфу. У таких умовах виникає локальний мікроклімат, який визначає нерівномірність процесів вивітрювання, міграції тонкодисперсних частинок і вологи. Це сприяє формуванню мозаїчних екологічних ніш, що відрізняються за тепловим і водним режимом та доступністю біогенних елементів, унаслідок чого рослинний покрив і біоценози мають виражену просторову неоднорідність.³³

Природне заростання відвалів відбувається за закономірною схемою сукцесій. На початковому етапі, що триває в середньому 5–6 років, формується незамкнутий рослинний покрив, представлений переважно рудеральними видами з широкою екологічною амплітудою та високою здатністю до розмноження. У подальшому, на другій стадії (приблизно 6–10 років), відбувається ускладнення видового складу, зменшення частки однорічних бур'янів і зростання ролі багаторічних трав та деревно-чагарникових форм. Третя стадія, яка настає після 10–12 років, характеризується домінуванням багаторічних рослин і підвищенням екологічної диференціації фітоценозів.³³

Видовий склад і швидкість формування рослинного покриву значною мірою залежать від фізико-хімічних властивостей розкривних порід, ступеня їх засолення, гранулометричного складу та способу формування відвалів. На лесоподібних суглинках і супісках процеси заростання відбуваються швидше, тоді як на важких третинних глинах і засолених породах формування стабільних фітоценозів може

тривати понад 8–10 років. Особливості рельєфу також відіграють важливу роль: у понижених елементах відвалів, де акумулюється волога, рослинність формується швидше, ніж на ерозійно небезпечних схилах.

У процесі природного заростання відбувається поступова зміна піонерних рудеральних угруповань на більш стійкі багаторічні рослинні асоціації, здатні використовувати вологу та поживні речовини з глибших горизонтів. Це супроводжується початковими стадіями ґрунтотворення, зокрема дерновим процесом, однак інтенсивність і швидкість цих процесів залишаються низькими порівняно з природними ґрунтами.³⁴

Практичні спостереження свідчать, що неконтрольований випас худоби, ущільнення поверхні та ерозійні процеси можуть суттєво уповільнювати або деградувати сформований рослинний покрив. Водночас у стабільних умовах природне заростання здатне створювати фітоценози, придатні для обмеженого господарського використання, зокрема як природні пасовища.³⁴

Природне заростання є важливим, але повільним біологічним механізмом рекультивації кар'єрно-відвальних ландшафтів. Його доцільно розглядати не як самодостатній метод, а як допоміжний або початковий етап біологічної рекультивації, ефективність якого суттєво зростає за умови поєднання з технічними та агротехнічними заходами.

2.7.3. Агротехнічні методи біологічної рекультивації

Агротехнічні методи є невід'ємною складовою біологічного етапу рекультивації порушених земель і спрямовані на створення сприятливих едафічних умов для приживлюваності та розвитку рослинності на малопродуктивних техногенних субстратах. Їх основна мета полягає у поліпшенні родючості, структури та водного режиму рекультивованих ґрунтів, що є необхідною передумовою формування стабільного рослинного покриву. Розкриті породи, характерні для гірничо-видобувних відвалів, як правило, позбавлені гумусу, мають низький вміст

доступних поживних елементів і несприятливі фізичні властивості, у зв'язку з чим застосування комплексу агротехнічних прийомів є критично важливим.

Одним із базових агротехнічних заходів є механічний обробіток субстрату, який здійснюється перед посівом трав або посадкою деревно-чагарникових культур. Обробіток включає глибоке розпушування на значну глибину з метою руйнування ущільненого шару, що формується внаслідок роботи важкої техніки під час технічного етапу рекультивації. Такий прийом покращує аерацію кореневмісного горизонту, підвищує водопроникність і створює сприятливі умови для розвитку кореневої системи. Після нанесення родючого шару або потенційно родючих порід доцільним є проведення дискування та боронування, які забезпечують подрібнення грудок, вирівнювання поверхні та збереження ґрунтової вологи, що сприяє рівномірним сходам рослин.³⁵

Важливим елементом агротехнічних заходів є внесення органічних і мінеральних добрив, оскільки одним із лімітуючих факторів росту рослин на рекультивованих відвалах є дефіцит азоту та фосфору. Застосування мінеральних добрив у складі повного комплексу макроелементів дозволяє забезпечити стартове живлення рослин і стимулює розвиток кореневої системи на початкових етапах вегетації. Органічні добрива, зокрема торф, компости, перегній або інші органічні матеріали, відіграють важливу роль у формуванні гумусового горизонту, підвищенні буферної здатності ґрунту та активізації ґрунтової біоти. В умовах обмежених ресурсів природного ґрунту ефективним є використання альтернативних органічних матеріалів, за умови їх екологічної безпечності.³⁵

Ефективним і відносно економічним методом біологічного збагачення рекультивованих ґрунтів є сидерація, або використання зелених добрив. Посів бобових культур-фітомеліорантів сприяє накопиченню біологічного азоту завдяки симбіозу з бульбочковими бактеріями. Після заорювання зеленої маси в ґрунт відбувається її мінералізація, що забезпечує надходження доступних поживних речовин, покращує структуру ґрунту та підвищує вміст органічної речовини. Сидерація особливо доцільна на ранніх стадіях біологічної рекультивації, коли сформований ґрунтовий профіль ще є нестабільним.

Окрему групу агротехнічних заходів становить регулювання водного режиму рекультивованих територій. Техногенні відвали характеризуються швидким пересиханням поверхні та інтенсивним стіканням атмосферних опадів, що негативно впливає на приживлюваність рослин. З цією метою застосовують мульчування поверхні ґрунту рослинними матеріалами, яке зменшує випаровування, запобігає утворенню ґрунтової кірки та покращує мікроклімат кореневої зони. Додатково можуть використовуватися заходи зі снігозатримання або формування дрібного мікрорельєфу, що сприяє накопиченню вологи у зимово-весняний період. Перспективним напрямом є також застосування вологоутримуючих матеріалів при посадці рослин, що підвищує їх виживання в умовах посушливого клімату.³⁵

Значну роль у біологічній рекультивації відіграє стимулювання мікробіологічної активності ґрунту, оскільки техногенні субстрати зазвичай є біологічно інертними. Для запуску ґрунтоутворювальних процесів використовують інокуляцію насіння бобових культур спеціалізованими мікробіологічними препаратами, що підвищує ефективність біологічної азотфіксації. Додатковим прийомом є внесення невеликих обсягів ґрунту з природних екосистем, який слугує джерелом аборигенної мікрофлори та мікоризних грибів, необхідних для формування стійкого ґрунтового біоценозу.

2.7.4. Фітомеліорація та травосіяння

Фітомеліорація є початковою та найбільш динамічною стадією біологічної рекультивації порушених земель гірничо-видобувних підприємств. Вона передбачає формування стійкого трав'янистого покриття, основними функціями якого є запуск первинних ґрунтоутворювальних процесів, накопичення органічної речовини, стабілізація поверхні техногенних відвалів від водної та вітрової ерозії, а також поліпшення мікрокліматичних умов для подальшого розвитку деревно-чагарникової рослинності.

Специфічні умови відвальних ландшафтів залізорудних районів, зокрема висока кам'янистість субстрату, дефіцит доступної вологи, значні добові та сезонні

коливання температур і практична відсутність гумусу, зумовлюють необхідність використання піонерних видів рослин. Такі рослини повинні характеризуватися підвищеною екологічною пластичністю, стійкістю до стресових факторів і здатністю швидко формувати кореневу систему та надземну біомасу.³⁶

Ключовим елементом фітомеліорації є добір видів фітомеліорантів. Для рекультивації відвалів доцільно використовувати багаторічні трав'янисті рослини, які поєднують високу посухостійкість, невибагливість до родючості ґрунту, розвинену кореневу систему та здатність до самовідновлення. Особливе значення мають бобові культури, які завдяки симбіозу з бульбочковими бактеріями забезпечують біологічну фіксацію атмосферного азоту та збагачення субстрату доступними формами поживних елементів. До ефективних піонерних рослин належать дворічні та багаторічні бобові, здатні розвиватися на щербенистих і малопродуктивних породах, формуючи глибоку кореневу систему, що виконує функцію біологічного розпушення та дренажу ущільнених горизонтів.³⁶

Поряд із бобовими, важливу роль у фітомеліорації відіграють злакові трави, основною функцією яких є формування щільної дернини. Завдяки густій сітці коренів і кореневищ злакові види забезпечують механічне закріплення верхнього шару ґрунту, зменшують пиління та змив дрібнозему, а також підвищують стійкість сформованого рослинного покриву до ерозійних процесів. Поєднання бобових і злакових видів дозволяє одночасно вирішувати завдання живлення рослин і стабілізації поверхні відвалів.

Практика рекультивації доводить, що монокультури на техногенних субстратах є малостійкими, тому оптимальним підходом є створення полікомпонентних травосумішей. Такі суміші формуються з переважанням бобових компонентів і доповнюються злаковими видами, що забезпечує функціональну взаємодію між рослинами. Бобові культури відіграють роль біологічного джерела азоту, тоді як злакові формують структурний «каркас» дернини. Різна глибина проникнення корневих систем сприяє ефективнішому використанню вологи з різних горизонтів субстрату та підвищує загальну стійкість фітоценозу.³⁶

Технологія травосіяння на рекультивованих землях має низку особливостей порівняно з традиційним землеробством. Через несприятливі умови техногенних субстратів норми висіву насіння, як правило, збільшують з метою компенсації зниженої польової схожості. На відносно рівних ділянках відвалів застосовують рядковий або суцільний посів із використанням спеціалізованих сівалок, поєднаний із коткуванням для забезпечення щільного контакту насіння з ґрунтом. На крутих схилах, де механічне оброблення є обмеженим або неможливим, ефективним є гідропосів, який передбачає нанесення водної суміші насіння, добрив, мульчуючих матеріалів і стабілізаторів. Мульчуючі компоненти захищають насіння від вимивання та пересихання, створюючи сприятливі умови для проростання.³⁷

У таблиці 2.3 зображено основні фітомеліоранти для рекультивації відвалів, їх переваги та обмеження.

Таблиця 2.3 — Основні фітомеліоранти для рекультивації відвалів, їх переваги та обмеження

Група рослин	Вид (приклад)	Біологічна роль	Переваги	Недоліки / обмеження
Бобові трави	Буркун (<i>Melilotus spp.</i>)	Азотфіксація, розпушення	Посухостійкий, росте на бідних породах	Короткий життєвий цикл
	Люцерна (<i>Medicago spp.</i>)	Накопичення гумусу	Висока біомаса	Чутлива до кислотності
	Еспарцет (<i>Onobrychis spp.</i>)	Фітомеліорація схилів	Посухостійкий	Повільний старт
Злакові трави	Костриця (<i>Festuca spp.</i>)	Дерноутворення	Стійка до ерозії	Не фіксує азот
	Житняк (<i>Agropyron cristatum</i>)	Закріплення ґрунту	Жаростійкий	Низька біомаса
	Стоколос (<i>Bromopsis inermis</i>)	Укріплення укосів	Потужне коріння	Може домінувати
Травосуміші	Бобово-злакові суміші	Комплексна дія	Стійкий фітоценоз	Потребує добору складу

2.7.5. Лісомеліоративні методи рекультивації

Лісомеліорація є завершальним і найбільш довготривалим етапом біологічної рекультивації порушених земель гірничо-видобувних підприємств. Вона спрямована на формування стійких штучних лісових біогеоценозів, які забезпечують стабілізацію техногенного ландшафту, виконують захисні, санітарно-гігієнічні та ґрунтоутворювальні функції, а також сприяють екологічній інтеграції рекультивованих територій у навколишній природний простір.

Принципи добору деревних і чагарникових порід. Добір асортименту лісових культур для рекультивації відвалів залізрудних підприємств базується на принципі екологічної відповідності рослин умовам техногенного середовища. Основними критеріями відбору є висока екологічна пластичність, стійкість до посушливого клімату та інтенсивної інсоляції, здатність переносити підвищене запилення і газове забруднення, а також невибагливість до родючості субстрату. Перевага надається швидкорослим породам, які здатні у відносно короткі строки сформувати зімкнутий деревостан і забезпечити захисний ефект.

Склад і структура лісомеліоративних насаджень. Для рекультивації техногенних відвалів доцільним є створення багаторусних деревно-чагарникових насаджень. Каркас насаджень формують основні деревні породи, які характеризуються високою стійкістю до несприятливих умов і добре розвиненою кореневою системою. Особливе значення мають види, здатні до біологічної фіксації азоту та активного поліпшення властивостей субстрату. На відносно стабільних платоподібних ділянках із нанесеним родючим шаром можливе використання більш вимогливих порід, тоді як на схилах і бідних субстратах перевага надається ксерофітним та літофільним видам.³⁷

Супутні чагарникові породи виконують функцію формування підліску, зменшують перегрів поверхні ґрунту, сприяють його зволоженню та створюють умови для заселення території тваринним світом, що прискорює природні сукцесійні процеси.

Роль лісових культур у довготривалій стабілізації відвалів. Лісомеліоративні насадження відіграють ключову роль у протиерозійному захисті рекультивованих територій. Потужні кореневі системи дерев проникають у глибші горизонти техногенного масиву, механічно зміцнюючи його та знижуючи ризик зсувів і глибокого розмиву схилів. Окрім цього, лісові насадження виконують кліматорегулюючу та санітарно-гігієнічну функції, зменшуючи швидкість вітру, запиленість повітря та екстремальні температурні коливання на поверхні відвалів.

У таблиці 2.4 зроблена порівняльна характеристика травосіяння та лісомеліорації як методів біологічної рекультивації.

Таблиця 2.4 — Порівняльна характеристика травосіяння та лісомеліорації як методів біологічної рекультивації

Критерій порівняння	Травосіяння (фітомеліорація)	Лісомеліорація	Аналітичний висновок
Мета застосування	Швидка стабілізація поверхні, запуск ґрунтоутворення	Довготривала екологічна стабілізація території	Методи доповнюють один одного за часовою шкалою
Термін досягнення ефекту	1–3 роки	5–10 років	Травосіяння ефективніше на початковому етапі
Протиерозійна ефективність	Висока для поверхневої ерозії	Висока для глибинної ерозії та зсувів	Лісомеліорація забезпечує глибше укріплення
Вплив на ґрунтоутворення	Початкове накопичення органіки	Формування стабільного гумусового горизонту	Лісомеліорація має триваліший ефект
Витрати на впровадження	Порівняно низькі	Високі	Травосіяння економічно доступніше
Догляд	Мінімальний після приживлення	Потребує догляду у перші роки	Лісові культури більш вимогливі
Стійкість екосистеми	Середня	Висока	Лісові насадження екологічно стабільніші
Доцільність для відвалів	Початковий та допоміжний етап	Завершальний етап рекультивації	Оптимальне поєднання обох методів

2.7.6. Біоремедіаційні методи

Біоремедіаційні методи є важливою складовою біологічної рекультивації техногенних відвалів і спрямовані на зменшення екологічної небезпеки, пов'язаної з наявністю у субстраті важких металів та інших токсичних сполук. Суть біоремедіації полягає у використанні здатності рослин і пов'язаних із ними біологічних процесів до трансформації, локалізації або вилучення забруднювачів із ґрунтового середовища.

Одним із основних напрямів біоремедіації є фітостабілізація, яка передбачає зниження рухомості та біодоступності токсичних елементів без їх фізичного вилучення з субстрату. У процесі фітостабілізації коренева система рослин впливає на хімічні властивості ризосфери, сприяючи переведенню важких металів у малорухомі, екологічно менш небезпечні форми. Одночасно формується щільний рослинний покрив, який перешкоджає пилінню та вторинному забрудненню повітря. Для реалізації цього методу доцільно використовувати злакові трави та осокові види, що утворюють розгалужену кореневу систему та ефективно закріплюють верхній шар техногенного субстрату.³⁷

Іншим напрямом біоремедіації є фіторемедіація, яка полягає у здатності окремих видів рослин поглинати та накопичувати токсичні елементи у надземній біомасі. У результаті регулярного скошування і видалення рослинної маси відбувається поступове зниження концентрації забруднювачів у ґрунті. Для цього використовують рослини-гіперакумулятори, здатні інтенсивно засвоювати важкі метали та інші небезпечні сполуки. Фіторемедіація є екологічно безпечним, але тривалим процесом, ефективність якого залежить від властивостей субстрату, кліматичних умов і правильного підбору рослинних видів.³⁷

Основні механізми фіторемедіації, що визначають її ефективність, включають:

Фітотрансформацію (фітодеградацію) — поглинання органічних токсичних речовин та їх ферментативне перетворення у менш небезпечні форми. Цей процес реалізується за участі рослинних ферментів (зокрема цитохрому Р-450), здатних каталізувати реакції окиснення та розкладання забруднювачів. Окремим напрямом є

використання трансгенних рослин, у яких посилено експресію ферментів детоксикації.³⁸

Фітоекстракцію — поглинання забруднювачів кореневою системою з подальшим транспортуванням до надземних органів. Цей механізм є ключовим для вилучення важких металів (Zn, Pb, Cd, Ni, U тощо). Саме за цим принципом працюють гіперакумулятори, зокрема *Brassica juncea*, що має здатність накопичувати свинець і кадмій.³⁸

Фітоволатилізацію — трансформацію забрудників у леткі або менш токсичні форми з їх подальшим виведенням у атмосферу. Процес характерний для деяких форм As, Se та Hg.

Фітостабілізацію — зменшення рухомості та біодоступності токсикантів шляхом утворення малорозчинних комплексів у ризосфері, сорбції на поверхні коренів або зміцнення структури субстрату. У техногенних умовах цей механізм відіграє важливу роль у запобіганні пиловому переносу та міграції важких металів.

Різофільтрацію — очищення ґрунтових і поверхневих вод у зоні кореневої системи через активність ґрунтових мікроорганізмів, які здатні руйнувати або трансформувати політанти. Ризосфера є середовищем інтенсивних біохімічних процесів, де взаємодія корневих виділень та мікробних угруповань прискорює мінералізацію або стабілізацію токсикантів.³⁸

2.7.7. Мікробіологічні методи відновлення ґрунтів

Техногенні відвали гірничо-видобувних підприємств характеризуються вкрай низьким рівнем біологічної активності та практичною відсутністю природної ґрунтової мікрофлори. У таких умовах без цілеспрямованого стимулювання мікробіологічних процесів підтримання рослинного покриву та формування ґрунтоутворних процесів є неможливими. Тому мікробіологічні методи відіграють ключову роль у системі біологічної рекультивациі порушених земель.

Одним із основних напрямів мікробіологічного відновлення є активація процесів ґрунтоутворення шляхом інтродукції корисних мікроорганізмів. Застосування

біопрепаратів на основі азотфіксуючих бактерій сприяє збагаченню субстрату біологічно доступними формами азоту, тоді як фосфатмобілізуєчі мікроорганізми забезпечують переведення важкорозчинних сполук фосфору у форми, доступні для засвоєння рослинами. Це дозволяє значно підвищити ефективність росту рослин навіть на бідних техногенних породах із несприятливими агрохімічними властивостями.

Важливим компонентом мікробіологічних методів є мікоризація, яка передбачає формування симбіотичних зв'язків між кореневою системою рослин і ґрунтовими грибами. Штучне заселення коріння деревних і чагарникових культур мікоризними грибами значно розширює поглинальну поверхню кореневої системи, покращує водо- та мінеральне живлення рослин і підвищує їх стійкість до посушливих умов. У регіонах із дефіцитом вологи та високими температурними навантаженнями мікориза є одним із вирішальних чинників успішної приживлюваності лісомеліоративних насаджень.³⁹

Окремий напрям мікробіологічної рекультивації становить біодеградація органічних забруднювачів, зокрема нафтопродуктів. На локально забруднених ділянках застосовують спеціалізовані штами бактерій-деструкторів, здатних розкладати вуглеводневі сполуки до екологічно безпечних продуктів — води та вуглекислого газу. Реалізація цього підходу дозволяє зменшити токсичність субстрату та створити умови для подальшого біологічного відновлення території.

Доповненням до зазначених методів є використання біоактивних органічних матеріалів і технологій ефективних мікроорганізмів, які стимулюють мінералізацію органічних решток та прискорюють накопичення гумусових сполук. Внесення таких препаратів активізує мікробіологічні процеси, сприяє формуванню початкового гумусового горизонту та покращує агрофізичні властивості рекультивованих ґрунтів уже на ранніх етапах відновлення.³⁹

У таблиці 2.5 зазначені мікробіологічні методи відновлення ґрунтів, механізм дії та екологічний ефект від цих методів.

Таблиця 2.5 — Мікробіологічні методи відновлення ґрунтів, механізм дії та екологічний ефект

Мікробіологічний метод	Механізм дії	Очікуваний екологічний ефект
Азотфіксуючі бактерії	Фіксація атмосферного азоту та переведення його у доступні для рослин форми	Підвищення родючості, стимуляція росту рослин
Фосфатмобілізуючі мікроорганізми	Розчинення важкодоступних сполук фосфору	Покращення мінерального живлення рослин
Мікоризація	Симбіоз грибів з коренями рослин, розширення зони поглинання	Підвищення виживаності рослин, стійкість до посухи
Бактерії-деструктори нафтопродуктів	Біохімічне розкладання вуглеводнів	Зменшення токсичності ґрунту
ЕМ-технології та біогумус	Активізація мікробіоти та прискорення мінералізації органіки	Формування гумусового горизонту

2.8. Порівняльний аналіз ефективності методів рекультивації відвальних ландшафтів

Для обґрунтованого вибору доцільної технології рекультивації порушених земель необхідно здійснити порівняльний аналіз наявних методів за ключовими критеріями, зокрема екологічною результативністю, швидкістю відновлення, технічною здійсненністю та економічними витратами. Особливості відвальних ландшафтів АТ «ПівдГЗК», до яких належать значна кам'янистість субстрату, велика висота відвалів і крутизна схилів, зумовлюють різну ефективність окремих методів рекультивації та визначають їхню роль у загальній технологічній схемі.

У таблиці 2.6 наведено порівняльний аналіз ефективності методів рекультивації відвальних ландшафтів.

Таблиця 2.6 — Порівняльний аналіз ефективності методів рекультивації відвальних ландшафтів

Група методів	Основна функція	Екологічна ефективність	Час досягнення ефекту	Обмеження застосування
Технічні та агротехнічні	Формування стабільного рельєфу, підготовка поверхні	Середня (без біологічного етапу нестійка)	Короткий	Висока вартість, не самодостатні
Фітомеліорація (травосіяння)	Швидке закріплення поверхні, пилопригнічення	Середня	Дуже короткий	Обмежена глибина кореневої системи
Лісомеліорація	Довготривала стабілізація та ґрунтоутворення	Висока	Тривалий (5–10 років)	Складність реалізації на крутих схилах
Біоремедіація	Зменшення токсичності субстрату	Висока (локально)	Середній	Потребує спеціального підбору рослин
Мікробіологічні методи	Активация ґрунтоутворення	Висока (як доповнення)	Середній	Чутливість до умов середовища

Технічні та агротехнічні методи становлять базову, обов'язкову основу будь-якої системи рекультивації гірничих відвалів. Умови формування відвальних ландшафтів, зокрема значна висота ярусів, крутизна схилів і неоднорідний гранулометричний склад порід, унеможливають їх екологічно безпечне використання без попереднього інженерного впорядкування. Планування поверхні та терасування схилів забезпечують геотехнічну стабільність відвалів, знижують ризик зсувів, обвалів і лінійної ерозії, а також створюють передумови для подальшого виконання рекультиваційних робіт. Важливою перевагою технічних і агротехнічних заходів є можливість їх повної або часткової механізації, що дозволяє реалізовувати роботи на великих площах у відносно стислі строки.

Разом із тим, ефективність технічного та агротехнічного етапів має чіткі обмеження. За відсутності біологічної складової сформовані поверхні залишаються функціонально «інертними» і не здатні до самовідновлення. Вирівняні тераси та плато без рослинного покриву швидко піддаються водній ерозії, формуванню ярів і дефляційним процесам, особливо в умовах інтенсивних опадів або сильних вітрів. Таким чином, технічні й агротехнічні методи не можуть розглядатися як самодостатні та мають застосовуватися виключно у взаємозв'язку з біологічними заходами.

Ключовим елементом вибору біологічної стратегії рекультивації є співвідношення між фітомеліорацією (травосіянням) і лісомеліорацією. Фітомеліорація характеризується високою оперативністю та відносною технологічною простотою. Використання трав'янистих фітомеліорантів, зокрема за допомогою гідропосіву, дозволяє у короткі строки сформувати суцільний рослинний покрив, який ефективно знижує пилове навантаження, обмежує поверхневий змив і стабілізує верхній шар субстрату. Ця властивість має особливе значення для відвалів, розташованих у межах або поблизу санітарно-захисних зон населених пунктів.

Водночас, екологічна ефективність фітомеліорації обмежується біоморфологічними особливостями трав'янистих рослин. Їх мичкувата коренева система, як правило, охоплює лише верхні 15–20 см субстрату, що забезпечує захист від поверхневої ерозії, але не гарантує стабільності глибинних шарів відвального масиву. За тривалої відсутності догляду або в умовах екстремальних кліматичних факторів трав'яний покрив може деградувати, що знижує довготривалу ефективність цього методу.⁴⁰

Лісомеліорація, на відміну від травосіяння, орієнтована на досягнення максимальної екологічної стабільності в довгостроковій перспективі. Деревні породи з глибокою та розгалуженою кореневою системою проникають у тіло відвалу на значну глибину, виконуючи функцію біологічної арматури. Це суттєво підвищує стійкість схилів, знижує ризик глибинних деформацій і забезпечує формування стабільного мікроклімату. Окрім протиерозійної ролі, лісові

насадження сприяють накопиченню органічної речовини, активізації ґрунтоутворювальних процесів і формуванню повноцінних екосистем.

Разом із тим, лісомеліорація має низку технологічних і економічних обмежень. Вона потребує значних початкових інвестицій, тривалого періоду досягнення екологічного ефекту та ретельного догляду за насадженнями на ранніх етапах розвитку. Посадка деревних культур на крутих схилах часто ускладнена або взагалі неможлива без застосування ручної праці, що обмежує масштаби впровадження цього методу на окремих ділянках.

Біоремедіаційні та мікробіологічні методи є найбільш інноваційними складовими сучасних систем рекультивації. Їх принципова перевага полягає у здатності трансформувати техногенний субстрат «зсередини», знижуючи його токсичність і підвищуючи біологічну активність без необхідності повного вилучення або заміни порід. Застосування рослин-фіторемедіаторів, мікроорганізмів-деструкторів і мікоризних комплексів дозволяє активізувати ґрунтоутворення навіть на біологічно інертних субстратах, де традиційні агротехнічні підходи є малоефективними.⁴⁰

Ефективність біоремедіаційних і мікробіологічних методів значною мірою залежить від точності їх наукового обґрунтування та постійного екологічного моніторингу. Неправильний підбір рослин або мікробних штамів, відсутність контролю за динамікою концентрацій забруднювачів і станом мікробіоценозів може призвести до зниження результативності або навіть негативних екологічних наслідків. Тому ці методи доцільно застосовувати як складову комплексної технології рекультивації з обов'язковим науковим супроводом.

2.9 Обґрунтування вибору комбінованої технології рекультивації для АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат»

Відвальні породи ПівдГЗК є техногенними утвореннями з переважанням кварцу (55–62 %) та амфіболових силікатів (10–14 %). Карбонатні мінерали представлені переважно доломітом і кальцитом у кількості 6–8 %, що значно нижче, ніж на

відвалах інших комбінатів регіону. Через низький вміст сульфідів (0,2–0,4 %) середній показник рН водної витяжки відвалів ПівдГЗК близький до нейтрального (6,7–7,4), проте високий вміст SiO_2 (>60 %) зумовлює слабкі буферні властивості цих порід. Таким чином, у верхніх шарах відвалу може спостерігатися лише незначне зниження рН (до 6,2–6,5) під впливом атмосферного зволоження. Гранулометричний склад надзвичайно неоднорідний: частка крупноуламкових фракцій (40–120 мм) домінує, тоді як вміст дрібнодисперсного пилю (<1 мм) становить лише 8–12 %, що вкрай низько для ґрунту (для порівняння, у хвостах збагачення – понад 55 %). Це призводить до нерівномірного водопроникнення: крупні шари мають високий коефіцієнт фільтрації (3,5–6,8 м/добу), а дрібні – дуже низький (0,12–0,35 м/добу). Отже, великі порожнини сприяють швидкому стоку води, а дрібнодисперсні горизонти – утворенню застійних зон, що підсилює ерозійну чутливість схилів.

Хімічний аналіз показує, що відвальні породи містять підвищені концентрації таких метало-елементів, як марганець, ванадій, нікель, мідь, цинк та (меншою мірою) кадмій і свинець. Загалом загальні концентрації важких металів у валовому складі близькі до природного фону, але дрібні фракції відвалів значно збагачені Mn, Zn, Cu, Cd. Техногенний ґрунт відвалів характеризується нерівномірним розподілом мікроелементів і потенційною мобільністю важких металів у тонких частинках. Урахування цієї неоднорідності є критичним для оцінки екологічних ризиків і планування рекультивації: дрібнодисперсні частки мають найбільшу сорбційну здатність, тому важкі метали у них швидше розчиняються за змінних умов середовища. Отже, фізико-хімічні властивості відвалів (нейтральна кислотність, низька буферність, висока щільність і неоднорідність гранулометрії) створюють малопривабливе середовище для рослин, що потребує інтенсифікованого втручання.

Гірничо-геологічні особливості та ризики рекультивації. Відвали ПівдГЗК утворені послідовним насипанням порід від кар'єрних робіт. Їх схили є надзвичайно крутими (іноді до $\approx 35^\circ$) з багаторівневою насипною структурою. Такий рельєф знижує геотехнічну стійкість масивів: нестабільні схили потребують додаткових протиерозійних заходів. Великий уклон разом із неоднорідним складом (чергування

крупних брил і пилу) зумовлює нерівномірний розподіл опадів і ґрунтових вод по профілю відвалу, посилюючи ризик локальних зсувів та ерозії. Крім того, висока густина породного матеріалу і малий вміст дрібних фракцій ускладнюють природне проростання рослин і утворення ґрунту. Складні гірничо-геологічні умови в комплексі з техногенним хімічним фоном (низька родючість субстрату та нерівномірне розподілення елементів) значно ускладнюють імовірність самовідновлення ділянки та накладають вимогу застосування комбінованої технології.

Для АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» найбільш доцільними є лісогосподарський, санітарно-гігієнічний і частково рекреаційний напрями рекультивації, оскільки вони забезпечують довготривалу стабілізацію високих скельних відвалів, ефективне пилопригнічення та зниження техногенного навантаження на прилеглі населені території за умов обмеженої придатності субстратів для сільськогосподарського використання.²⁶

Етапи запропонованої комбінованої технології рекультивації. Рекультивацію таких складних відвалів доцільно проводити поетапно, поєднуючи технічні та біологічні заходи (підготовчий, гірничо-технологічний, технічний і біологічний етапи). Пропонована технологія включає:

1) Технічні заходи: терасування та екранізація

Терасування відкосів відвалу дозволяє знизити кут схилу і розподілити гідрологічний тиск, що підвищує геотехнічну стійкість масиву. Згідно з патентними розробками, після відсипання кожного ярусу схил необхідно покрити потенційно родючим шаром ґрунту і організувати дренажні канами для відведення води.

Такий підхід значно зменшує змивання ґрунту за відвалом і обмежує ерозію. Екранування (геоізоляція) укосів захисним покриттям чи геоматами додатково перешкоджає внутрішньому переміщенню ґрунтових мас і виносу дрібних часток. Перевагою цього етапу є суттєве зниження механічної нестійкості та запобігання негативному впливу опадів. Проте технічні роботи дорогі і вимагають ретельного інженерного розрахунку: помилки у конструкції тераси чи дренажу можуть призвести до зрушень матеріалу та значного погіршення стійкості.

Властивості субстрату відвалів ПівдГЗК характеризуються поєднанням крутих схилів до 35° і домінуванням крупноуламкових фракцій розміром 40–120 мм, що зумовлює низьку природну здатність поверхні до самозаростання та підвищені ризики поверхневого змиву. За таких умов проявляється так званий гранулометричний парадокс: грубоуламкові шари мають високий коефіцієнт фільтрації (3,5–6,8 м/добу), тоді як дрібнодисперсні прошарки відзначаються значно нижчою водопроникністю (0,12–0,35 м/добу).

У результаті одночасно формуються інтенсивний поверхневий стік із розвитком ерозійних процесів, локальні застійні зони з перезволоженням і переущільненням субстрату, а також винесення пилової фракції, яка є основним носієм важких металів, зокрема Mn, Zn і Cd.

Терасування зменшує кут схилу, розбиває довжину стоку і знижує руйнівну енергію потоків, а екранізація геоматами фізично утримує дрібні частки та формує первинну протиерозійну «арматуру» для техногрунту.

Терасування у поєднанні з екранізацією геоматами формує первинну протиерозійну «арматуру» для техногрунту, яка забезпечує його механічну фіксацію на схилах і запобігає змиву до моменту формування повноцінного рослинного покриву. Такий підхід є науково та технічно обґрунтованішим порівняно з альтернативними варіантами рекультивації.

Для відвалів ПівдГЗК терасування з екранізацією геоматами формує первинну протиерозійну «арматуру» техногрунту та є оптимальним рішенням з огляду на крутизну схилів до 35° і переважання крупноуламкових фракцій. Виключно біологічні методи за таких умов неефективні, оскільки насіння і тонкий ґрунтовий шар змиваються до укорінення рослин. Суцільне перепрофілювання відвалів або завезення товстого шару привізного ґрунту є значно дорожчими, енергозатратними й технологічно складними та не узгоджуються з безперервною роботою комбінату, тоді як терасування забезпечує необхідну стабілізацію поверхні з мінімальними вторинними порушеннями.

Якщо етап пропустити втрачається контроль ерозії та стоку → змив техногрунту, пиління, виносення металовмісної дрібної фракції, неможливість стабільного укорінення.

2) Формування фітозбагаченого шару

Покриття відвалів родючим шаром (компостованим матеріалом або агрономічним ґрунтом) створює сприятливі умови для розвитку рослин. Цей фітозбагачений шар містить необхідні поживні речовини й мікроелементи для початкового росту трав і дерев. Як пропонується в наукових рекомендаціях, ґрунтоутворюючий шар слід вносити до початку нового циклу насипання, закладаючи його паралельно терасуванню. Завдяки цьому підсипаний ґрунт міцно закріплюється базисом відвалу і менше виноситься з потоком води. Створення техногрунту з біоактивними добавками стимулює розкладання органічної речовини й «включає в роботу» важкодоступні поживні компоненти, що прискорює ґрунтоутворення. Однак ефективність цього заходу залежить від якості внесеного ґрунту та цілісності ґрунтового покриву: без подальшої стабілізації трав'янисто-кореневим покривом «родючий шар» може вимиватися.

У практичному розрізі для ПівдГЗК формування фітозбагаченого шару є ключовим елементом рекультивації, оскільки відвальні породи комбінату характеризуються високим вмістом $\text{SiO}_2 (>60\%)$ і, відповідно, слабкою буферною здатністю. За умов нейтрального рН (6,7–7,4) така мінералогічна будова не забезпечує хімічної стабільності субстрату: під впливом атмосферних опадів можливе локальне підкислення верхніх горизонтів, що підвищує рухомість Mn, Zn і Cd та ризик їх міграції в інфільтраційні потоки. Нанесення фітозбагаченого шару з органічними компонентами створює ефективний хімічний і фізичний демпфер, який стабілізує кислотно-лужний режим, зв'язує важкі метали в орґано-мінеральні комплекси та підвищує водоутримання в умовах дефіциту дрібнозему.²⁶

Порівняно з альтернативними підходами, такий варіант є найбільш доцільним саме для ПівдГЗК. Відмова від ґрунтового шару на крупноуламкових відвалах призводить до повної відсутності стартових умов для рослин і фактичного зриву біологічної рекультивації. Використання лише мінеральних меліорантів (вапнування,

доломітизація) за наявного близького до нейтрального рН не вирішує проблеми низької буферності і може спричиняти локальне перенасичення кальцієм. Завезення товстого шару чорнозему для великих площ відвалів ПівдГЗК є економічно й логістично необґрунтованим та залишається нестійким без попередньої інженерної фіксації.

3) Біологічний етап: травосіяння і мікоризація дерев

Після укріплення технічної основи відвалів виконується гідропосів багаторічних трав, що мають щільну кореневу систему. Гідропосів забезпечує рівномірний розподіл насіння та допоміжних компонентів (мулоніт, ґрунт) по схилу, швидко даючи покрив із злакокормових трав чи бобових. Такий зелений покрив стабілізує ґрунтовий шар, знижує пиловидну токсичність та додатково збагачує ґрунт органікою. Одночасно на тераси висаджують деревні породи: переважно білу акацію та кримську сосну. Ці види є маловимогливими та здатними закріплювати грубі продукти вивітрювання за рахунок сильної, глибокої кореневої системи. Перед висадкою саджанців ґрунт інокулюють мікоризними грибами, що підсилює поглинання фосфору і мікроелементів із бідного субстрату. Перевагами цього етапу є утворення довгострокових фітоценозів, що забезпечують довготривалу стабілізацію схилу. Водночас ризиками є тривалі строки накопичення біомаси та необхідність догляду за молодими деревами.⁴⁰

У практичному розрізі для ПівдГЗК застосування мікоризації та деревної рослинності є науково обґрунтованим через бідність відвальних порід на доступні форми поживних елементів, насамперед фосфору, низький вміст дрібнодисперсних фракцій і нестабільний водний режим. За таких умов мікоризний симбіоз істотно підвищує поглинання фосфору й мікроелементів, розширює ефективну зону живлення кореневої системи та підвищує стійкість рослин до посухи, сольового й металевого стресу, що є типовим для техногенних субстратів ПівдГЗК. Висадка піонерних деревних порід (зокрема акації білої та сосни кримської) забезпечує формування довготривалої каркасної кореневої системи, яка стабілізує тераси, знижує запиленість за рахунок створення санітарно-захисного екрану та ініціює сукцесійні процеси з переходом до більш стійких фітоценозів.

Порівняно з альтернативними рішеннями, такий підхід є ефективнішим саме для умов ПівдГЗК. Обмеження рекультивації лише трав'янистим покривом забезпечує швидкий старт, але не формує довготривалої протиерозійної та санітарно-захисної функції. Безпосередня висадка вимогливих аборигенних лісових видів на ранньому етапі є ризикованою через бідність і нестабільність субстрату, тоді як піонерні породи здатні прижитися в екстремальних умовах і підготувати середовище для подальшого збагачення насаджень. Використання лише мінеральних добрив без мікоризного симбіозу має короточасний ефект і супроводжується втратами поживних елементів через вимивання, тоді як мікориза забезпечує їх більш ефективне та стабільне використання.

4) Використання фіторе mediaційних культур

Окрім фіксації ґрунту, доцільно використовувати культури, які здатні зменшувати токсичність відвалів. Наприклад, гірчиця сарептська активно накопичує важкі метали з ґрунту, зокрема барій, цинк і кадмій, що робить її корисною для початкової ремедіації. Вербка є ще одним перспективним фіторе mediaтором – її швидкоросла біомаса добре зв'язує метали і може поглинати Cd, Zn, Pb в різних частинах рослини. Застосування цих культур належить до фітостабілізації – технології, коли метал іонів іммобілізуються в зоні кореня і тимчасово виводяться з біологічного кругообігу. Перевага фіторе mediaції в рекультивації відвалів полягає в додатковому очищенні субстрату та утворенні органічної речовини. Проте накопичені токсикантами рослинні рештки треба збирати й утилізувати, щоб уникнути вторинного забруднення.³⁸

Для ПівдГЗК фіторе mediaційний блок із використанням гірчиці сарептської та верби є науково обґрунтованим, оскільки важкі метали на відвалах комбінату зосереджені переважно у дрібнодисперсній фракції, яка водночас є найбільш мобільною та схильною до пиління, поверхневого змиву і міграції разом з інфільтраційними потоками через грубоуламкові шари. Застосування фіторе mediaції, переважно у формі фітостабілізації з елементами фітоекстракції, забезпечує фіксацію металів у кореневій зоні та в органо-мінеральних комплексах, зменшує їх рухомість за умов локальних коливань рН і суттєво знижує ризик надходження

забруднювачів у підземні води на фоні високої фільтраційної здатності відвальних порід.

Порівняно з альтернативними підходами, такий варіант є найбільш раціональним саме для ПівдГЗК. Пасивне ігнорування проблеми металів із розрахунком на нейтральний рН є небезпечним через слабку буферність силікатного субстрату та можливі локальні зсуви кислотності, які різко підвищують біодоступність металів. Механічне вилучення або заміна дрібної фракції на великих площах відвалів є економічно та технологічно нереалістичними, тоді як хімічна іммобілізація лише реагентами не усуває пиління і не формує стабільного екосистемного покриву. Фіторе mediaція, на відміну від цих підходів, одночасно знижує екотоксичність, стабілізує поверхню відвалів і інтегрується в біологічний етап рекультивації без порушення виробничого циклу комбінату.

Ризики та переваги етапів рекультивації. Кожен із запропонованих етапів має свої плюси й мінуси в умовах крутих відвалів ПівдГЗК. Терасування суттєво підвищує геотехнічну стійкість схилів та знижує ерозію, але пов'язане з високими капіталовкладеннями та потребою складної інфраструктури (дрени, земляні роботи). Зворотнім ризиком є можливість неповного закріплення родючого шару на терасі, якщо будуть порушені роботи з послідовного насипання. Нанесення фітозбагаченого (родючого) шару значно полегшує установлення рослин, проте ефективно тільки за умови швидкої фіксації ґрунту рослинами – інакше ґрунт може бути вимитий. Гідропосів трав забезпечує швидке зростання покривних трав і пригнічує пилову активність, однак його якість залежить від добору суміші трав та рівномірності зрошення. Мікоризація та заліснення посилюють довготермінову фіксацію ґрунту, хоча вимагають часу для росту дерев; ризики полягають в необхідності догляду за саджанцями і можливості витіснення місцевих видів рослин.

Фіторе mediaція додатково вирішує проблему перенасичення ґрунту важкими металами: гірчиця, верба та інші культури зв'язують або поглинають токсиканти, зменшуючи їх рухомість. Це значно знижує екотоксичність і створює умови для подальшого розвитку фітоценозу. Проте накопичені в рослинах метали треба

видаляти з ділянки (біомаса не підходить для компостування), інакше існує ризик перенесення забруднення.

Комбінована технологія, що поєднує поетапні технічні та біологічні заходи (терасування, екранізацію, внесення фітозбагаченого шару, травосіяння, мікоризацію, застосування фіторемедіаторів), є оптимальним рішенням для закриття екологічних та геотехнічних ризиків відвалів ПівдГЗК. Такий підхід дозволяє максимально врахувати специфіку фізико-хімічного складу субстрату та складного рельєфу, утримуючи ерозійні процеси і поновлюючи екосистемні функції відвалів.

Вагомою перевагою запропонованої комбінованої технології рекультивації є її поетапний характер, що забезпечує високий рівень керованості процесу відновлення порушених земель. Поетапна реалізація рекультиваційних заходів дозволяє коригувати технологічні рішення на будь-якій стадії залежно від отриманих результатів моніторингу, оцінювати ефективність окремих етапів у часовій динаміці, а також адаптувати програму рекультивації до змін кліматичних, економічних або виробничих умов.

Для АТ «ПівдГЗК» така гнучкість має принципове значення з огляду на сучасні соціально-економічні реалії. Підприємство функціонує в умовах підвищеного воєнного та фінансового навантаження, що обмежує можливості одночасного впровадження масштабних природоохоронних проєктів. Повномасштабна рекультивація всіх відвальних масивів у короткі строки є технічно та економічно нереалістичною, особливо з урахуванням значної площі й багаторівневої структури відвалів.

Також ще однією перевагою запропонованої комбінованої технології рекультивації є її здатність органічно інтегруватися в чинну виробничо-технологічну систему АТ «ПівдГЗК» без необхідності кардинальних змін у процесах гірничодобувної діяльності. Рекультиваційні заходи в межах обраної схеми не розглядаються як відокремлений або зовнішній природоохоронний проєкт, а формують складову єдиного циклу раціонального використання мінерально-сировинних ресурсів підприємства.

Запропонована технологія передбачає використання розкривних порід та супутніх гірничих матеріалів як потенційно родючих або структуроутворювальних компонентів при формуванні відвальних поверхонь. Такий підхід дозволяє зменшити обсяги зовнішнього завезення ґрунтових матеріалів і водночас підвищити ресурсну ефективність виробництва за рахунок внутрішнього перерозподілу матеріальних потоків.

Крім того, схема рекультивації допускає залучення відходів суміжних виробництв — золи, органічних матеріалів, стабілізованих осадів — як меліорантів або джерел органічної речовини, що відповідає принципам циркулярної економіки та знижує навантаження на системи зберігання відходів. Важливою особливістю є те, що реалізація рекультиваційних заходів не потребує зупинки або обмеження основного технологічного процесу видобутку та збагачення руди, що робить запропоновану схему практично здійсненою в умовах безперервного функціонування комбінату.

В таблиці 2.7 зазначено обґрунтування вибору комбінованої технології рекультивації для АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат».

Таблиця 2.7 — Обґрунтування вибору комбінованої технології рекультивації для АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат»

Ключова особливість відвалів ПівдГЗК	Екологічна / технологічна проблема	Елемент комбінованої технології	Обґрунтування вибору та очікуваний ефект
Висока крутизна та багатоярусність відвалів	Ризик зсувів, ерозії та неможливості біологічного освоєння	Гірничотехнічний етап: терасування та планування	Забезпечення геотехнічної стійкості, створення умов для наступних етапів рекультивації
Переважає крупноуламкових фракцій (40–120 мм)	Відсутність кореневмісного шару, низька водоутримувальна здатність	Селективне формування та землевання	Формування дрібноземистого середовища для закріплення рослин
Високий коефіцієнт фільтрації та швидке висихання субстрату	Дефіцит вологи в кореневій зоні	Хіміко-технічний етап: екранування суглинками	Затримання вологи, стабілізація водного режиму
Нейтральний рН і помірний вміст важких металів	Ризик міграції Mn, Zn, V у рухомих формах	Фітомеліорація та фітостабілізація	Зменшення біодоступності металів, екологічна стабілізація
Біологічна інертність і відсутність мікрофлори	Повільне ґрунтоутворення	Мікробіологічна інокуляція (мікориза, бактерії)	Запуск ґрунтоутворювальних процесів і підвищення життєздатності рослин

ВИСНОВКИ

1. У процесі виконання кваліфікаційної роботи встановлено, що діяльність АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» супроводжується утворенням значних обсягів розкривних порід і багатоярусних техногенних відвалів, які є основним джерелом порушення земель та формування техногенних ландшафтів із підвищеним ризиком ерозії, запилення і деградації прилеглих територій. За умов безперервного режиму роботи підприємства ці відвали потребують технологічно сумісних рішень, що не вимагають зупинки основного виробництва.

2. Аналіз фізико-хімічних властивостей відходів гірничодобувної діяльності ПівдГЗК показав, що ключовими обмежувальними факторами рекультивації є не критичні концентрації токсичних елементів, а фізична інертність силікатного субстрату, переважання крупноуламкових фракцій, низький вміст органічної речовини та нестабільний водний режим. Саме ці особливості унеможливають ефективне природне самовідновлення відвалів і потребують цілеспрямованого інженерно-біологічного втручання.

3. Узагальнення вітчизняного та міжнародного досвіду рекультивації порушених земель гірничодобувної промисловості підтвердило, що для об'єктів типу відвалів ПівдГЗК найбільш результативними є комбіновані поетапні технології, які інтегрують гірничотехнічні, агротехнічні та біологічні заходи. Застосування окремих методів без урахування специфіки рельєфу і субстрату не забезпечує довготривалої стабілізації схилів і не знижує екологічні ризики в зоні впливу комбінату.

4. На основі порівняльного аналізу методів рекультивації обґрунтовано доцільність впровадження на ПівдГЗК комбінованої поетапної технології, що включає терасування відвалів, формування вологоутримувального та протиерозійного екрана з потенційно родючих розкривних порід, фітомеліорацію та лісомеліорацію із застосуванням піонерних і азотфіксуючих порід. Практична цінність запропонованої схеми полягає в можливості компенсації фізичних

недоліків техногенного субстрату без залучення значних обсягів привізного ґрунту та з використанням внутрішніх матеріальних потоків підприємства.

5. Запропонована технологія рекультивації є адаптованою до виробничих, економічних та просторових умов ПівдГЗК, може реалізовуватися поетапно паралельно з експлуатацією відвалів і не потребує зупинки процесів видобутку та збагачення руди. Її впровадження забезпечує зниження пилового навантаження, стабілізацію схилів, зменшення ризику вторинної міграції забруднювачів і формування довготривало стійких рослинних угруповань, що в сукупності сприяє поліпшенню санітарно-гігієнічного стану довкілля та екологічної безпеки прилеглих до комбінату територій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- ¹ Природа Криворіжжя. Клімат. [Електронний ресурс].–URL: <https://kdpu.edu.ua/pryroda-kryvorizhzhia/fizyko-heohrafichna-kharakterystyka/klimat.html> (дата звернення Лист 15, 2025).
- ²Криворізький державний педагогічний університет. Природа Криворіжжя. Гідрологія. [Електронний ресурс]. – URL: <https://kdpu.edu.ua/pryroda-kryvorizhzhia/fizyko-heohrafichna-kharakterystyka/hidrolohiia.html> (дата звернення Лист 15, 2025).
- ³Криворізький державний педагогічний університет. Природа Криворіжжя. Рослини. <https://kdpu.edu.ua/pryroda-kryvorizhzhia/zhyvyi-svit/roslyny.html> (дата звернення Лист 15, 2025)
- ⁴ ПрАТ «ПівдГЗК». Офіційний сайт [Електронний ресурс].–URL: <https://www.ugok.com.ua/ua/> (дата звернення Лист 17, 2025).
- ⁵ Офіційний сайт YouControl. [Електронний ресурс] URL:<https://youcontrol.com.ua> (дата звернення Лист 17, 2025)
- ⁶ ПрАТ «ПівдГЗК». Корпоративний звіт 2025; ПрАТ «ПівдГЗК»: Кривий Ріг, 2024; с. 5–20
- ⁷ Петренко, М. І. Екологічні ризики хвостосховищ. Екологічний вісник України 2022, 7(2), с. 45–55
- ⁸ Крамарьов, С. М. Фізико-хімічні властивості відходів та їх вплив на рухомість важких металів. Матеріали конференції, Матеріали науково-практичної конференції, Дніпро, Україна, 2020; Дніпровський державний аграрно-економічний університет: Дніпро, 2020; с. 45–49
- ⁹ Савосько, В. М.; Невядомський, М. А.; Кудрявий, П. Ю. Фізико-хімічні властивості субстратів хвостосховищ Криворізького залізорудного басейну. Проблеми біоіндикації та екології [Online]. 2010, 230 с URL: (дата звернення Лист 25, 2025)
- ¹⁰ Savchenko, V.O.; Bilyk, Yu.M. Soil transformation under technogenesis in iron ore regions. Ukrainian Journal of Ecology, 2020, 14(3), 89–97.

- ¹¹ Долін, В. В.; Трофимчук, О. М. Геохімічні особливості відвальних порід та хвостів збагачення залізорудних підприємств Криворізького басейну. Екологічні науки [Online]. 2014, с. 45–55. URL: <https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2014/1/8.pdf> (дата звернення Лист 25, 2025)
- ¹²Томашівський З. М., Коник Г. С., Періг Г. Т. та ін. Рекультивація порушених земель : монографія / за наук. ред. Г. С. Коника. Львів : Сполом, 2010. 280 с.
- ¹³ Земельний кодекс України: Закон України від 25 жовт. 2001 р. № 2768-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14> (дата звернення Груд 03, 2025).
- ¹⁴ Про охорону земель: Закон України від 19 черв. 2003 р. № 962-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15> (дата звернення Груд 03, 2025).
- ¹⁵ Hüttl, R.F.; Weber, E. Forest ecosystem development in post-mining landscapes: a review. *Ecological Engineering*, 2019, 127, pp 270–300
- ¹⁶ Колотій, А. В. Оцінка ерозійної стійкості схилів відвалів залізорудних кар'єрів. *Науковий вісник будівництва*: Харків, 2015. № 3 (81); с 140–160.
- ¹⁷ Prach, K.; Hobbs, R.J. Spontaneous succession versus technical reclamation in post-mining sites. *Restoration Ecology*, 2008, 16(3), pp 360–366.
- ¹⁸ Capra, G.F.; Ganga, A.; Grilli, E. Technosols in reclaimed mining areas: properties and evolution. *Catena*, 2021, 203, 11 с.
- ¹⁹ Демидов, О.А. Удосконалення класифікації рекультивованих ґрунтів; Наукові доповіді Національного університету біоресурсів природокористування України; НУБіП України: Київ, 2014; Том 1 (Випуск 1), с 1–8
- ²⁰ Smirnova S.M., Smirnov V.M., Kozak A.I. Scientific aspects of urban territories use. *Economy of Ukraine* 2020, (1), 145-152.
- ²¹ Tripathi, N., Singh, R.S., Hills, C.D.; Reclamation of Mine-Impacted Land for Ecosystem Recovery; 1st ed.; Wiley-Blackwell: Chichester, UK, 2016; ISBN 9781119057901; 1–298 pp.
- ²² Fashchyla O.I., Hladun O.V. Territorial pattern and classification of soils of Kryvyi Rih Iron-Ore Basin. *Ukrainian Journal of Ecology* 2014, (4), pp 120-130
- ²³ Nahirniak, S.V.; Volchok, S.M. Ecological reclamation strategies for mining waste in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 2022, 16(2), 56–65.

- ²⁴ Томашівський, З. М.; Коник, Г. С.; Періг, Г. Т.; Оліфір, Ю. М.; Панахид, Г. Я.; та ін. Рекультивация порушених земель, 1-ше вид.; Видавництво Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН: Оброшине, 2012; 336 с.
- ²⁵ Ali, H.; Khan, E.; Sajad, M.A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*, 2013, 91, 13 с.
- ²⁶ Бойко, І. І.; Савчук, П. Д. Техніка та технології рекультивації відвалів. Монографія; НУХТ: Київ, 2022; 200 с.
- ²⁷ Бієць В. В. Геотехнічна стійкість високих відвалів Кривбасу в умовах техногенного навантаження. *Науковий вісник НГУ*. 2013. № 4. С. 15–21.
- ²⁸ Павличенко, А. В.; Анпілова, Є. С. Дослідження можливості використання розкривних порід для рекультивації порушених земель. *Збірник наукових праць НГУ: Дніпро*, 2015. № 47; 300 с.
- ²⁹ Балюк, С. А.; Медведєв, В. В.; Трускавецький, Р. С.; Цапко, Ю. Л.; Фатєєв, А. І.; Мірошніченко, М. М.; Шимель, В. В.; Левін, С. К.; Лактіонов, М. І.; Бикін, А. В. та ін. Меліорація кислих та солонцюватих ґрунтів: теоретичні основи та практика, 1-ше вид.; Наукове видання ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського»; Аграрна наука: Київ, 2018; Том 1; 250 с.
- ³⁰ Попович, В. В. Роль лісових насаджень у процесах фітостабілізації відвалів. *Науковий вісник НЛТУ України*: Львів, 2016, 120 с.
- ³¹ Shevchenko Yu.M., Kovalchuk I.P. Justification of the method for phytoremediation of degraded and contaminated lands by composite vermicompost briquettes. *Taurida Journal of Earth Sciences* 2019, (3), 112-120
- ³² Баранець М. О. Роль мікоризи у фіторекультивації залізорудних відвалів. *Екологія та ноосферологія*. 2018. Т. 29. № 1. 100 с.
- ³³ Белоконь, М. В.; Белоконь, М. Б. Сучасні проблеми екологічної безпеки функціонування гірничо-збагачувальних комбінатів. *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*: Харків, 2019. № 849; С. 90–96.
- ³⁴ Méndez, C.M., et al.; Phytoremediation Strategies for Tailings Reclamation; CSIC Digital Repository, 2025; 1–120 pp

³⁵ Ткаченко, О.П.; Сидоренко, О.В. Сутність і зміст еколого-економічних трансформацій як передумов упровадження обмеженого використання сільськогосподарських земель; Агросвіт; ТОВ «ДКС Центр»: Київ, 2020; Випуск 9, с. 14–20

³⁶ Грицай, З. В. Вплив важких металів на ріст та розвиток *Brassica juncea* на техногенних субстратах. Український ботанічний журнал: Київ, 2020. № 77 (3); С. 201–209.

³⁷ Cunningham, S.D., Berti, W.R., Huang, J.W.; Phytoremediation of Contaminated Soil and Water; 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, 2003; 45–360 pp.

³⁸ Ступник, М. І.; Павличенко, А. В.; Федотов, В. В.; Антропов, І. В.; Горова, А. І.; Письменний, С. В.; Савицький, В. М.; Белік, С. О.; Курило, Л. В.; Шепель, О. Л. та ін. Екологічні технології відновлення порушених ландшафтів гірничодобувних регіонів, 2-ге вид.; Серія «Промислова екологія»; Журфонд: Дніпро, 2021; Том 1; с. 45–98.

³⁹ Gastauer, M.; Silva, J.R.; Caldeira, C.F. Ecosystem services recovery in post-mining landscapes. Science of the Total Environment, 2022, 806, 12 c

⁴⁰ Horlachuk V.V., Klymenko O.V. Land resources management in the context of decentralization of public administration and strengthening of the autonomy of local self-government bodies. Agrosvit 2019, (20), 10-15.