

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра гірничої справи

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП «Відкрита розробка родовищ»

Ольга БОГОМАЗ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Відкрита розробка родовищ»
за спеціальністю 184 Гірництво

**на тему «Удосконалення системи гірничо-геологічного контролю
якості сировини з метою підвищення ефективності робіт
ПрАТ «ПівнГЗК»**

Керівник роботи

Іван САХНО

Консультант від
бази практики

Олександр СМІРНОВ

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач

Олена ШАМРАЙ

<i>Підсумкова оцінка за атестацію</i>			
---------------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Ігор ТОНЄВ

Запоріжжя 2026

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА БАКАЛАВРСЬКОГО РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет гірничо-металургійний
Кафедра гірничої справи
Ступінь
вищої освіти бакалавр
Спеціальність 184 Гірництво
ОПП Відкрита розробка родовищ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Гарант освітньої програми
_____ Ольга БОГОМАЗ
«20» __лютого__ 2026р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Шамрай Олена Михайлівна

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. **Тема роботи** «Удосконалення системи гірничо-геологічного контролю якості сировини з метою підвищення ефективності робіт ПрАТ «ПівнГЗК» керівник роботи: Сахно Іван Георгійович, доктор техн. наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 21.02.2026 №41

2. **Термін подання роботи** 15.06.2026

3. **Вихідні дані до роботи** : Гірничо-геологічні, гідрогеологічні та гірничотехнічні умови Першотравневого родовища залізистих кварцитів ПрАТ «ПівнГЗК». Фактичні дані параметрів розробки глибокого кар'єру (глибина понад 400 м). Показники мінливості вмісту загального (Fe {заг} в межах 30–34%) та магнітного (Fe {маг}) заліза в рудних тілах. Статистичні матеріали аналітичних даних відділу технічного контролю (ВТК) та хімічної лабораторії управління контролю якості підприємства. Діюча технологічна схема та регламенти пробопідготовки (сушіння, дроблення, скорочення, стирання). Параметри існуючої сітки шарошкового (шламового) опробування вибухових свердловин та оперативного забійного опробування

4. **Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ.**

Розділ 1. Гірничо-геологічна характеристика підприємства

1.1. Загальні відомості про підприємство ПрАТ «ПівнГЗК»

1.2. Геологічна будова та якісні показники залізистих кварцитів Першотравневого родовища

1.3. Гідрогеологічні та гірничотехнічні умови розробки кар'єру

- Розділ 2. Аналіз існуючої системи контролю якості сировини
- 2.1. Організація гірничо-геологічної служби на підприємстві
 - 2.2. Методологія та види опробування сировини в умовах кар'єру (шарошкове та забійне опробування)
 - 2.3. Аналіз стабільності якісних показників руди та технологія пробопідготовки в лабораторії

Розділ 3. Обґрунтування та удосконалення методів гірничо-геологічного контролю

- 3.1. Впровадження інноваційних методів оперативного контролю вмісту заліза (портативні та потокові РФА-аналізатори)
- 3.2. Оптимізація мережі випереджального експлуатаційного опробування на основі геостатистичного аналізу
- 3.3. Використання цифрових моделей покладу (3D ГІС-моделювання) для прогнозування якості сировини

Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):_1. План та геологічний розріз Першотравневого кар'єру ПрАТ «ПівнГЗК».
 2. Схема існуючої організаційної структури контролю якості та руху проб (Геологічна служба – ВТК – Лабораторія).
 3. Технологічна схема класичної лабораторної пробопідготовки.
 4. Графіки мінливості та варіограми розподілу вмісту заліза ($Fe_{\{заг\}}$ та $Fe_{\{маг\}}$).
 5. Схема оптимізованої (диференційованої) сітки шарошкового опробування вибухових свердловин у блоці.
 6. Елементи тривимірної цифрової блокової та каркасної моделі рудного блоку (3D ГІС).
-
6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Розділи 1–4	Сахно І. Г., доктор технічних наук, професор кафедри гірничої справи

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Збір та аналіз гірничо-геологічної інформації по родовищу	Лютий 2026 р.	Виконано
2.	Аналіз діючої системи опробування та роботи лабораторії контролю якості	Березень 2026 р.	Виконано
3.	Обґрунтування впровадження РФА-аналізаторів та розрахунків розрідження сітки свердловин	Квітень 2026 р.	Виконано
4.	Розробка цифрових блокових моделей та інтеграція даних у 3D ГІС	Травень 2026 р.	Виконано
5.	Оформлення розділу з охорони праці, формування загальних висновків та списку джерел	Травень 2026 р.	Виконано
6.	Передзахист роботи та подання заповненої праці керівнику	Червень 2026 р.	На захист

Керівник роботи

Іван Сахно

Здобувач

Олена Шамрай

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку гірничо-видобувної промисловості України характеризується ускладненням гірничо-геологічних умов розробки родовищ корисних копалин через перехід гірничих робіт на глибокі горизонти. Для залізорудних підприємств, зокрема таких потужних промислових комплексів, як ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» (ПрАТ «ПівнГЗК»), ефективна діяльність в жорстких умовах ринкової економіки безпосередньо залежить від забезпечення стабільно високої та прогнозованої якості залізорудної сировини, що надходить на збагачувальні фабрики [1].

В умовах інтенсивного відпрацювання глибоких горизонтів Першотравневого кар'єру спостерігається суттєве погіршення та мінливість гірничо-геологічних показників, а саме: природна гетерогенність покладів, значні коливання вмісту загального та магнітного заліза в рудних тілах, наявність прошарків пустих порід і некондиційних кварцитів. Це призводить до нестабільності якісних характеристик сировини у рудопотоці, суттєво ускладнює технологічний процес магнітного збагачення, збільшує витрати енергоресурсів та знижує загальний коефіцієнт вилучення заліза в концентрат [2].

Існуюча на підприємстві система контролю якості не завжди встигає оперативно реагувати на швидку зміну вибійних характеристик через тривалий цикл обробки традиційних геологічних проб. У зв'язку з цим, удосконалення системи гірничо-геологічного контролю шляхом впровадження інноваційних методів оперативного експрес-аналізу, оптимізації геологорозвідувальної мережі та використання сучасних цифрових технологій є критично важливим та актуальним науково-практичним завданням. Це дозволить мінімізувати втрати й засмічення руди під час видобутку, стабілізувати якість сировини та підвищити конкурентоспроможність кінцевої продукції комбінату [2].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до напрямів технологічного розвитку ПрАТ «Північний ГЗК», пов'язаних із модернізацією гірничо-транспортного комплексу, підвищенням ефективності видобувних робіт та цифровізацією управління якістю мінеральної сировини Першотравневого родовища [2].

Метою кваліфікаційної роботи є розробка, обґрунтування та впровадження комплексних заходів з удосконалення діючої системи гірничо-геологічного контролю, що забезпечить підвищення ефективності видобувних робіт і довгострокову стабілізацію якісних показників залізистих кварцитів, які направляються на збагачення [3].

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено та вирішено такі завдання:

1. Проаналізувати гірничо-геологічні, гідрогеологічні та якісні характеристики Першотравневого родовища залізистих кварцитів.

2. Оцінити сучасний стан організації гірничо-геологічної служби на ПрАТ «ПівнГЗК» та проаналізувати методологію і стабільність існуючих видів опробування.

3. Обґрунтувати доцільність впровадження інноваційних методів оперативного експрес-контролю вмісту заліза безпосередньо у вибоях кар'єру.

4. Виконати розрахунки щодо оптимізації параметрів мережі випереджального експлуатаційного опробування.

5. Дослідити можливості інтеграції цифрового 3D-моделювання покладу для оперативного прогнозування якості залізорудної сировини у рудопоці.

6. Розробити заходи з охорони праці та екологічної безпеки під час виконання гірничо-геологічних та опробувальних робіт в умовах кар'єру.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси гірничо-геологічного контролю якості залізистих кварцитів безпосередньо у Першотравневому кар'єрі ПрАТ «ПівнГЗК» [7].

Предмет дослідження – методи оперативного експлуатаційного опробування, алгоритми математичного прогнозування якісних показників та цифрові засоби стабілізації вмісту заліза в рудопотоці глибокого кар'єру.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань застосовано комплексний підхід, що базується на використанні:

- методів системного та порівняльного аналізу – для оцінки чинної системи опробування на підприємстві;
- методів математичної статистики – для обробки масивів аналітичних даних відділу технічного контролю (ВТК) та оцінки мінливості руди;
- методів геометризації та цифрового тривимірного моделювання – для створення прогнозованих моделей розподілу корисних компонентів у масиві родовища.

Наукова новизна отриманих результатів (проектний варіант):

- Досліджено закономірності просторової мінливості вмісту заліза на глибоких горизонтах Першотравневого родовища, що дозволило уточнити крок експлуатаційної розвідки.
- Удосконалено методику оперативного прогнозування якості залізи-стих кварцитів шляхом поєднання результатів випереджального опробування з цифровими тривимірними моделями блоків.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що запропоновані рекомендації щодо оптимізації мережі опробування та впровадження експрес-аналізаторів дозволяють знизити рівень засмічення руди пустими породами на 1.5 -- 2%, стабілізувати вміст заліза в рудопотоці, що подається на збагачувальну фабрику, та забезпечити економічний ефект за рахунок зниження технологічних витрат при збагаченні. Публікації та апробація (за наявності, необов'язково). Основні положення роботи доповідалися на щорічних науково-технічних конференціях студентів та молодих вчених [9].

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, 4-х взаємопов'язаних розділів, висновків та списку використаних

джерел. Загальний обсяг роботи становить __48__ сторінок комп'ютерного тексту, містить ____6_ рисунків, ____8__ таблиці. Список використаних джерел включає ____17__ найменувань.

1. ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРШОТРАВНЕВОГО РОДОВИЩА

1.1. Загальні відомості про підприємство ПрАТ «ПівнГЗК»

Приватне акціонерне товариство «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» (ПрАТ «ПівнГЗК») є одним із найбільших підприємств гірничо-металургійного комплексу Європи із завершеним циклом підготовки сировини для чорної металургії. Промисловий майданчик комбінату розташований у північній частині Криворізького залізорудного басейну [3].

Основною продукцією підприємства є залізорудний концентрат та окатки, стабільність якісних характеристик яких безпосередньо впливає на ефективність подальшого доменного та металургійного виробництва [5].

Стрижнем сировинної бази ПрАТ «ПівнГЗК» є видобуток залізистих кварцитів, який забезпечується двома потужними підрозділами: Ганнівським та Першотравневим кар'єрами. Ганнівський кар'єр здійснює відпрацювання однойменного Ганнівського родовища, що характеризується своїми специфічними структурно-текстурними особливостями руд. У свою чергу, Першотравневий кар'єр виконує розробку Першотравневого родовища, де на сучасному етапі розвитку гірничих робіт відбувається активне освоєння глибоких горизонтів. Обидва кар'єри функціонують у єдиній технологічній системі підприємства, забезпечуючи стабільний рудопотік для збагачувальних фабрик. Проте, зважаючи на тему даного дослідження, ключову увагу зосереджено на процесах гірничо-геологічного контролю саме в межах Першотравневого кар'єру, оскільки в умовах відпрацювання його глибоких горизонтів питання мінливості якісних показників сировини постає найбільш гостро [4].

1.2. Геологічна будова та якісні показники залізистих кварцитів

В геологічній будові Першотравневого родовища беруть участь метаморфізовані породи криворізької серії докембрію (рисунок 1.1).

Головним промисловим типом руд є залізисті кварцити (магнетитові та гематит-магнетитові), які залягають у вигляді потужних пластоподібних покладів. Продуктивна товща представлена переважно четвертим, п'ятим та шостим залізистими горизонтами. Структура родовища ускладнена складчастістю вищих порядків, а також зонами тектонічних порушень у вигляді скидів та зсувів, що зумовлює складну геометрію рудних тіл та контактів між рудою і пустими породами [4].

Головними компонентами, що визначають металургійну цінність руди, є вміст заліза загального ($Fe_{\text{заг}}$), який коливається в межах 30–34%, та вміст заліза магнітного ($Fe_{\text{маг}}$). Саме магнітне залізо є ключовим показником для технології магнітного збагачення, оскільки воно визначає рівень вилучення корисного компоненту в кінцевий концентрат. Основні показники, що визначають металургійну цінність руди та її фізико-механічні властивості, наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. – Фізико-механічні та якісні характеристики залізистих кварцитів Першотравневого родовища

Показник	Одиниця виміру	Діапазон значень / Середнє
Вміст заліза загального ($Fe_{\text{заг}}$)	%	30,0 – 34,0
Вміст заліза магнітного ($Fe_{\text{маг}}$)	%	22,0 – 26,5
Вміст діоксиду кремнію (SiO_2)	%	36,0 – 42,0
Коефіцієнт міцності руди за Протодьяконовим	f	14 – 16 (дуже міцні)
Об'ємна маса руди в масиві	т/м ³	3,4-3,6

Окрім корисних елементів, у руді контролюється вміст шкідливих домішок, зокрема діоксиду кремнію (SiO_2), сірки (S) та фосфору (P).

Характерною рисою покладів Першотравневого родовища є висока природна мінливість цих якісних характеристик як за простяганням, так і за падінням рудних тіл. Більше того, у зонах вторинних змін спостерігаються процеси окиснення, які призводять до появи гематитових руд, що мають значно нижчу збагачуваність у стандартних магнітних сепараторах. Така значна гетерогенність родовища вимагає безперервного моніторингу та високоточного опробування на всіх етапах видобувного циклу [9].

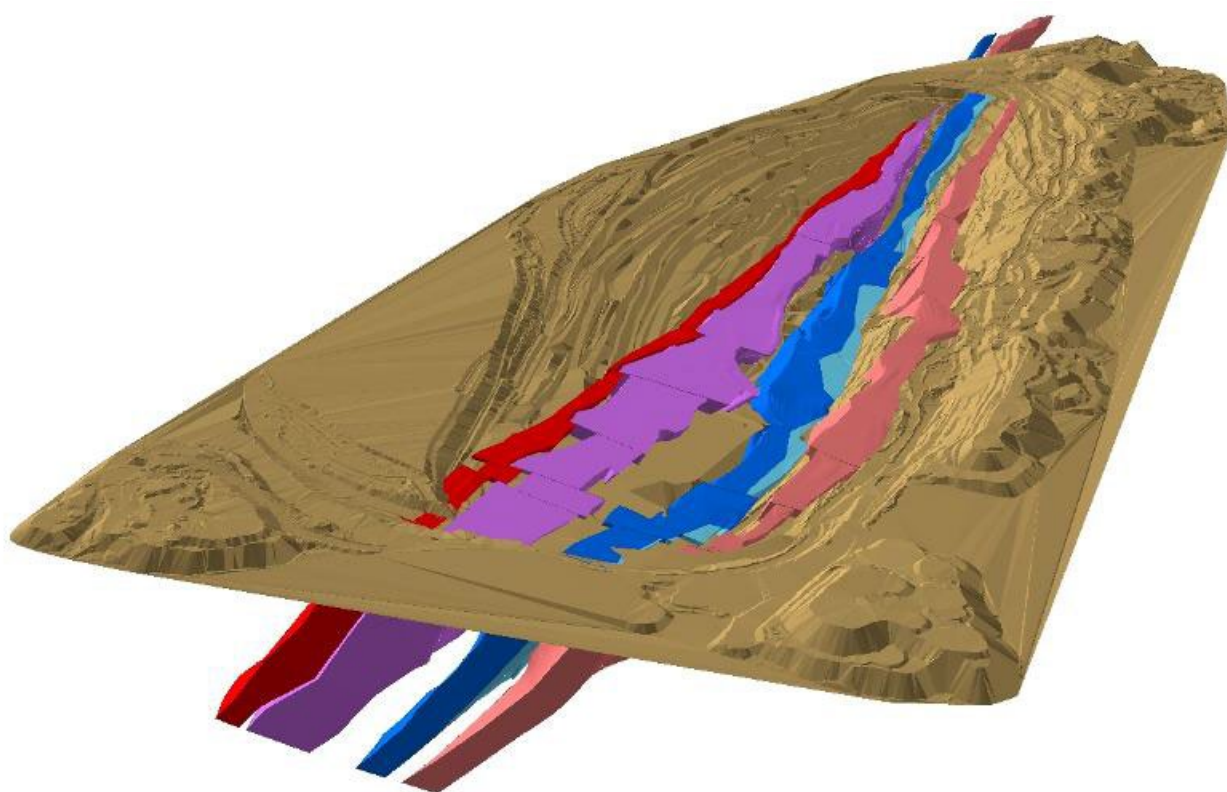


Рисунок 1.1. – Рудні поклади окислених і неокислених залізистих кварцитів

1.3. Гідрогеологічні та гірничотехнічні умови розробки кар'єру

Першотравневий кар'єр відноситься до категорії глибоких кар'єрів із висхідним та заглибленим розвитком гірничих робіт. Сучасна глибина кар'єру вже перевищує 400 метрів, що суттєво ускладнює його загальну

гірничотехнічну ситуацію. Розробка родовища ведеться із застосуванням буровибухових робіт для руйнування скельних порід, а транспортування руди забезпечується циклічно-потоковою та транспортною системами технологій. Основними чинниками, що ускладнюють гірничі роботи на глибоких горизонтах, є постійне збільшення коефіцієнта розкриву, звуження робочих майданчиків, яке обмежує маневреність видобувного та транспортного обладнання, а також зниження стійкості бортів кар'єру, що підвищує ризики зсувних явищ і вимагає постійного геотехнічного моніторингу [5].

Гідрогеологічна обстановка родовища додатково ускладнює виробничий процес і визначається наявністю кількох водоносних горизонтів у товщі осадових та метаморфічних порід, а також зоною тріщинної обводненості скельного масиву. Постійний приплив підземних вод призводить до обводнення робочих зон нижніх горизонтів, а сезонні атмосферні опади у вигляді зливових та талих вод викликають ерозію уступів та затоплення зумпфів. Для протидії цим явищам на підприємстві функціонує розвинена система централізованого та внутрішньокар'єрного водовідливу, що включає нагірні канали, водозбірники та потужні насосні станції. Окремим проблемним фактором є підвищена вологість підірваної рудної маси, яка ускладнює процеси грохочення та дроблення на збагачувальній фабриці, що змушує оперативно коригувати технологічні режими та здійснювати попереднє дренажування блоків [6].

Таким чином, сукупність складних геологічних, гідрогеологічних та гірничотехнічних умов на Першотравневому кар'єрі створює надзвичайно жорсткі вимоги до точності просторового прогнозування якості руд. Будь-яка похибка в геологічному забезпеченні видобувних робіт призводить до випадкового засмічення рудопотоку пустими породами або некондиційними кварцитами, безпосередньо знижуючи техніко-економічні показники всього збагачувального переділу комбінату [8].

2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ СИРОВИНИ

2.1. Організація гірничо-геологічної служби на підприємстві

Ефективне управління якістю залізорудної сировини на ПрАТ «ПівніГЗК» забезпечується чіткою взаємодією геологічного відділу, відділу технічного контролю (ВТК) та хімічної лабораторії управління контролю якості. Геологічна служба кар'єру відповідає за стратегічне та поточне планування, геометризацію покладів та побудову блокових моделей родовища. Проте первинне наповнення цих моделей фактичними даними та безпосередній контроль за якістю рудопотоку покладено на підрозділи ВТК та лабораторію. Контролери ВТК виконують функції безпосереднього відбору проб на робочих горизонтах кар'єру, стежать за недопущенням засмічення руди пустими породами під час екскавації та супроводжують рудну масу на всьому шляху її транспортування [7].

Отримані на промислових майданчиках проби надходять до спеціалізованої лабораторії управління контролю якості, яка забезпечена обладнанням для підготовки (дроблення, стирання) та виконання аналізів. Головним завданням цієї тристоронньої системи є оперативне постачання точної інформації про вміст корисних компонентів для коригування гірничих робіт, що дозволяє мінімізувати коливання якості сировини, яка спрямовується на дробильно-збагачувальні фабрики комбінату [7].

2.2. Методологія та види опробування сировини в умовах кар'єру

Діюча система геологічного та технічного контролю у Першотравневому кар'єрі базується на поєднанні випереджального та оперативного опробування, що генерує надзвичайно великий обсяг аналітичного матеріалу. Первинним і найбільш масовим етапом контролю є випереджальне експлуатаційне опробування, яке реалізується через шарошкове

(шламове) опробування вибухових свердловин. Під час розбурювання підірваного блока верстатами шарошкового буріння з кожної технологічної свердловини за допомогою спеціальних пробоотбірників виділяється шлам. Зважаючи на сітку буріння та значну кількість свердловин у блоці, щодня лабораторія приймає та обробляє сотні таких шарошкових проб. Аналіз цього масиву даних дозволяє геологам деталізувати контури рудних тіл всередині підготовленого до вибуху блока, визначити вміст загального та магнітного заліза і чітко розмежувати кондиційні кварцити, некондиційні пласти та скельну розкриву. Для порівняння функціональних особливостей випереджального та оперативного етапів контролю якості складено табл. 2.1.

Таблиця 2.1. – Порівняльний аналіз чинної системи опробування на ПрАТ «ПівнГЗК»

Критерій порівняння	Випереджальне експлуатаційне опробування	Оперативне забійне опробування (ВТК)
Об'єкт контролю	Шлам шарошкових вибухових свердловин	Підірвана рудна маса у вибої екскаватора
Періодичність	Перед кожним масовим вибухом блока	Щодня (цілодобово, у денні та нічні зміни)
Мета відбору	Контурованість блоків, розділення на типи	Оперативний контроль якості відвантаження
Час отримання результату	Від 12 до 24 годин (лабораторія)	Від 2 до 4 годин (класичний метод)

Наступним невід'ємним етапом є оперативне забійне опробування, яке здійснюється контролерами ВТК у безперервному циклі, включаючи денні та нічні зміни. Кожну зміну, незалежно від часу доби та погодних умов, фахівці ВТК проводять відбір проб безпосередньо з видобувних вибоїв, де працюють екскаватори. Це необхідно для контролю поточної якості рудної маси, що відвантажується у думпкери або автосамоскиди, оскільки реальний вибій після вибуху може демонструвати суттєві відхилення показників через змішування руди. Цілодобовий режим забійного опробування забезпечує диспетчерську службу кар'єру та збагачувальну фабрику оперативною інформацією, дозволяючи вчасно перенаправляти рудопотоки або застосовувати технологію усереднення руди на складах, запобігаючи аварійним ситуаціям на фабричному переділі [10].

2.3. Аналіз стабільності якісних показників руди та технологія прободготовки в лабораторії

Масивний потік шарошкових та забійних проб, що безперервно надходить із Першотравневого кар'єру, піддається суворо регламентованій процедурі підготовки в хімічній лабораторії управління контролю якості. Процес прободготовки є багатоетапним і включає послідовні операції сушіння, дроблення, скорочення та стирання матеріалу до аналітичної крупності. Первинні проби великої маси спочатку надходять до сушильних шаф для видалення кар'єрної вологи, що є критично важливим для запобігання налипанню матеріалу на стінки лабораторного обладнання. Після висушування руда проходить стадію попереднього та середнього дроблення на щоккових і валкових дробарках для зменшення розміру шматків. Наступним етапом є механічне скорочення проби за допомогою желобчатих дільників, що дозволяє виділити представницьку наважку для фінального стирання. Стирання матеріалу до порошкоподібного стану (крупністю менше 0,074 мм) виконується у стирачах вібраційного або дискового типу, після чого готова аналітична проба відправляється безпосередньо на

хімічний або магнітний аналіз для визначення вмісту загального (Fe заг) та магнітного (Fe маг) заліза. Послідовність операцій підготовки рудних проб до хімічного та магнітного аналізу відображено на блок-схемі (рис. 2.1).



Рисунок 2.1. – Блок-схема технологічного ланцюжка лабораторної пробопідготовки УКЯ ПрАТ «ПівнГЗК»

Аналіз діючої системи контролю показує, що такий колосальний обсяг рутинного матеріалу створює надмірне технічне та емоційне навантаження на персонал лабораторії, особливо під час нічних змін. Великий потік проб підвищує ризики виникнення випадкових похибок на етапі маркування та скорочення, а також прискорює знос робочих поверхонь дробильно-розмельного обладнання, що може призвести до механічного забруднення проб сторонніми домішками. Крім того, класичні хімічні та стандартні методи магнітного аналізу вимагають значних затрат часу, через що виникає часовий розрив між відбором проби у залізорудному вибої та отриманням фактичного результату лабораторії. В умовах високої природної мінливості якісних показників Першотравневого родовища цей розрив обмежує можливість оперативного реагування на зміну якості рудопотоку в режимі реального часу. Стабільність вмісту корисного компонента в руді, що надходить на фабрику, безпосередньо залежить від пропускної

здатності лабораторії, тому існуюча система потребує оптимізації шляхом автоматизації ручних процесів та впровадження методів експрес-аналізу.

2.4. Характеристика лабораторного обладнання та аналіз «вузьких місць» пробопідготовки.

Для забезпечення належної точності та представництва аналітичних даних у хімічній лабораторії управління контролю якості (УКЯ) ПрАТ «ПівніГЗК» використовується класичний комплекс дробильно-розмельного та допоміжного обладнання. Цей комплекс включає лабораторні щоківі дробарки (для первинного подрібнення великих шматків кар'єрної руди), валкові дробарки (для середнього дроблення), желобчасті дільники (для механічного скорочення та квартування матеріалу), сушильні електричні шафи та лабораторні вібростирачі (дискового та кільцевого типів) для доведення проб до аналітичної крупності менше 0,074 мм [9].

Проте детальний технологічний аналіз поточної роботи хімічної лабораторії дозволив виявити низку критичних «вузьких місць» та обмежень, які суттєво знижують загальну ефективність системи гірничо-геологічного контролю підприємства.

Головним обмеженням діючої технологічної схеми є надзвичайно висока питома вага ручної праці. На сьогоднішній день практично всі операції в лабораторії — починаючи від приймання, розвантаження та маркування важких мішків із кар'єрними пробами (маса яких нерідко досягає 10 кг і більше) і закінчуючи пересипанням матеріалу між стадіями дроблення, очищенням робочих зон приладів стисненим повітрям та ручним квартуванням — виконуються персоналом вручну. Це створює колосальне фізичне навантаження на апаратників та лаборантів [16 - 17].

Найбільш критичною та трудомісткою ланкою («вузьким місцем») у всьому ланцюжку пробопідготовки є стадія тонкого розмелу проб на рольгангу (роликовому стенді).

Конструкція цього вузла передбачає одночасну роботу восьми шарових млинів. Процес експлуатації рольганга характеризується такими негативними факторами: [17].

- Значна тривалість робочого циклу: для досягнення необхідного ступеня подрібнення міцних залізистих кварцитів ($f = 14-16$ за Протодьяконовим) один технологічний цикл стирання проб триває щонайменше півтори години в безперервному режимі. Це створює часові затримки у передачі матеріалу на подальший хімічний чи магнітний аналіз.

- Екстремальне фізичне навантаження: завантаження вихідної руди, монтаж та демонтаж важких металевих барабанів млинів, їх очищення від залишків подрібненого матеріалу та куль, а також вивантаження готового порошку здійснюються виключно вручну. За умов безперервного потоку проб протягом зміни це призводить до швидкої втомлюваності персоналу.

- Низька продуктивність та обмежена пропускна здатність: фіксована кількість гнізд на рольгангу (8 млинів) та значний час обробки не дозволяють оперативно збільшувати кількість аналізів у періоди пікових навантажень комбінату.

Додатковим дестабілізуючим чинником є те, що лабораторія працює у цілодобовому режимі. Під час нічних змін фактор втоми персоналу, викликаний монотонною та важкою ручною працею, суттєво зростає. Це підвищує ризик виникнення випадкових суб'єктивних помилок, таких як похибки при механічному скороченні проб, переплутування маркування або випадкове забруднення матеріалу сторонніми домішками через недостатнє очищення барабанів млинів після попередньої проби [17].

Таким чином, тривалий час роботи розмельного обладнання, жорсткі обмеження пропускної здатності та майже 100%-ва залежність від ручної праці формують значний часовий розрив (від 12 до 24 годин на шарошкове опробування) між моментом відбору проби у кар'єрі та отриманням кінцевого результату. В умовах інтенсивного відпрацювання глибоких горизонтів Першотравневого кар'єру та високої мінливості вмісту заліза така

затримка унеможлиблює оперативне керування якістю рудопотоку в режимі реального часу. Це повністю обґрунтовує необхідність модернізації системи шляхом автоматизації розмельних процесів та впровадження методів експрес-контролю (зокрема портативних та потокових РФА-аналізаторів), що детально розглянуто у третьому розділі роботи. Візуалізація найбільш трудомісткої ланки технологічного ланцюжка пробопідготовки представлена на рис. 2.2.



Рисунок 2.2. – Блок з найбільш енергозатратним процесом первинної підготовки проби.

3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ

3.1. Впровадження інноваційних методів оперативного контролю вмісту заліза

Для усунення часового розриву між відбором проб та отриманням результатів лабораторного аналізу, а також для зниження критичного навантаження на персонал хімічної лабораторії, обґрунтовано впровадження методів експрес-аналізу безпосередньо в умовах Першотравневого кар'єру. Основним інноваційним рішенням є інтеграція у виробничий процес переносних рентгенофлуоресцентних (РФА) аналізаторів руди [11].

Технологія РФА-моніторингу базується на вимірюванні спектра вторинного рентгенівського випромінювання, яке виникає під час збудження атомів досліджуваного матеріалу зовнішнім випромінюванням трубки приладу. Застосування таких портативних інструментів контролерами ВТК безпосередньо у видобувних вибоях під час денних та нічних змін дозволяє отримувати точні дані про вміст загального заліза ($Fe_{\text{заг}}$) протягом кількох хвилин, повністю виключаючи тривалу стадію доставки та класичної пробопідготовки матеріалу в лабораторії. Порівняльна характеристика оперативності та точності класичного методу аналізу порівняно з інноваційним РФА-моніторингом наведена в табл. 3.1.

Паралельно з ручними аналізаторами для стабілізації якості залізорудної сировини, що відвантажується на збагачувальні фабрики ПрАТ «ПівнГЗК», доцільно впроваджувати потокові конвеєрні РФА-аналізатори, які монтуються безпосередньо над стрічками магістральних конвеєрів або у вузлах перевантаження руди. Поточковий аналіз забезпечує безперервний моніторинг хімічного складу всього об'єму рудної маси в режимі реального часу, що дозволяє автоматизованій системі керування оперативно реагувати на критичні відхилення якості від заданої шихти. Отримані за допомогою РФА-технологій експрес-дані миттєво передаються на

диспетчерський пулт кар'єру, завдяки чому досягається максимальна оперативність управління рудопотоками. Це дозволяє здійснювати селективне вилучення руд різного технологічного типу, мінімізувати випадкове потрапляння некондиційних кварцитів у загальний потік та стабілізувати роботу секцій магнітної сепарації на фабриці [11].

Таблиця 3.1. – Техніко-економічне порівняння класичного хімічного аналізу та РФА-моніторингу

Параметр порівняння	Класичний лабораторний метод	Портативний РФА-аналізатор (інновація)
Місце проведення	Стаціонарна хімічна лабораторія	Безпосередньо у вибої кар'єру
Тривалість пробопідготовки	1,5 – 3 години (сушіння, подрібнення, стирання)	Не потребує (або експрес-підготовка за 1–2 хв)
Час виконання вимірювання	20 – 40 хвилин	60 – 120 секунд
Вплив людського фактора	Високий (ризик переплутати маркування вночі)	Мінімальний (цифрова фіксація та GPS-п'язка)
Оперативність для диспетчера	Низька (постфактум)	Абсолютна (у реальному часі)

«Оскільки транспортування руди з глибоких горизонтів Першотравневого кар'єру частково реалізовано із застосуванням циклічно-потоквої технології (ЦПТ), виникає можливість автоматизації контролю безпосередньо у рудопотоці. В межах модернізації системи контролю запропоновано монтаж поточкових конвеєрних рентгенофлуоресцентних аналізаторів

(РФА) безпосередньо над стрічками перевантажувальних вузлів магістральних конвеєрів ЦПТ [14].

Інтеграція конвеєрних РФА-датчиків у загальну систему ГІС дозволяє реалізувати алгоритм автоматичного селективного перенаправлення потоків сировини. У разі фіксації датчиком падіння вмісту заліза загального нижче бортового вмісту ($Fe_{заг} < 28\%$) або критичного зростання діоксиду кремнію ($SiO_2 > 45\%$), сигнал автоматично передається на АСУ ТП перевантажувального вузла. Завдяки цьому здійснюється автоматичне перемикання шиберів (розподільників рудопотоку), що спрямовує некондиційні кварцити або скельний розкрив у відвал, запобігаючи розубожуванню кондиційної руди та знижуючи марні енерговитрати на її підйом і транспортування на збагачувальну фабрику.» [11].

Для практичної реалізації системи оперативного РФА-моніторингу залізорудної сировини в умовах Першотравневого кар'єру обґрунтовано впровадження двох типів обладнання: портативних (ручних) аналізаторів для забійного та шламового опробування та поточкових (конвеєрних) систем для безперервного контролю рудопотоку циклічно-поточної технології (ЦПТ) [14].

1. Портативний рентгенофлуоресцентний аналізатор руд (для контролерів ВТК)

Як базову модель переносного експрес-аналізатора для роботи безпосередньо у вибоях кар'єру та на блоках підготовленого шарошкового шламу обрано Olympus Vanta VMR (серія Vanta M) (або сучасний аналог серії Evident Vanta).

- Опис та призначення: Прилад виконано у надміцному корпусі (клас захисту IP65/IP64), що дозволяє використовувати його цілодобово у денні та нічні зміни за будь-яких погодних умов Першотравневого кар'єру (запиленість, атмосферні опади, температура від $-10^{\circ}C$ до $+50^{\circ}C$). Модель оснащена потужною рентгенівською трубкою з родієвим (Rh) анодом

(напруга 50 кВ), що забезпечує високу точність збудження атомів важких та середніх елементів, зокрема заліза (Fe) та супутніх домішок (Si, Al, S, P).

- Переваги для підприємства: Прилад має вбудований GPS-приймач, що дає змогу автоматично прив'язувати результати заміру вмісту заліза до просторових координат вибою або конкретної підірваної вибухової свердловини у 3D ГІС-моделі.

Головні технічні характеристики Olympus Vanta VMR:

- Тип детектора: Кремнієвий дрейфовий детектор (SDD) великої площі з високою роздільною здатністю.

- Джерело випромінювання: Рентгенівська трубка, 4 Вт, анод Rh (родій), макс. Напруга 50 кВ.

- Діапазон визначення елементів: Від магнію (Mg) до урану (U).

- Час аналізу (експрес): 20 – 60 секунд (для стабільного визначення Fe_{заг} та SiO_2).

- Живлення / Захист: Літій-іонний акумулятор (до 8 годин роботи); захист від падіння за військовим стандартом MIL-STD-810G.

2. Поточний конвеєрний РФА-аналізатор (для систем ЦПТ)

Для інтеграції в автоматизовану систему керування рудопотоками на перевантажувальних вузлах ЦПТ глибокого кар'єру обґрунтовано встановлення потокового аналізатора конвеєрного типу Scantech GEOSCAN-M (або аналогічної системи на базі РФА/нейтронно-радіометричного аналізу) [14].

- Опис та призначення: Система монтується безпосередньо над магистральним стрічковим конвеєром без контакту з рудною масою. Вона здійснює безперервне сканування всього об'єму залізистих кварцитів, що рухаються по стрічці, аналізуючи хімічний склад у режимі реального часу.

- Переваги для підприємства: Інформація про поточний вміст Fe_{заг} та SiO_2 оновлюється кожні 2-3 хвилини і автоматично передається на диспетчерський пульт кар'єру та в АСУ ТП перевантажувального

вузла. Це дозволяє реалізувати автоматичне керування шиберами для відсікання некондиційних кварцитів або скельного розкриву без зупинки конвеєра.

Головні технічні характеристики Scantech GEOSCAN-M:

- Принцип роботи: Безперервний онлайн-аналіз геометрії рудопотоку на стрічці.
- Контрольовані компоненти: Fe_{заг} (точність $\pm 0.4\%$), SiO₂ (точність $\pm 0.5\%$), Al₂O₃, S.
- Ширина конвеєрної стрічки: Від 800 до 2000 мм (оптимально для магістральних конвеєрів ПрАТ «ПівніЗК»).
- Час інтеграції даних / виведення: Регульований, стандартно – кожні 30 – 120 секунд.
- Інтерфейси інтеграції: Modbus TCP/IP, OPC UA для прямого зв'язку з АСУ ТП та фабричними системами LIMS.



Рисунок 3.1 – Портативний РФА-аналізатор Olympus Vanta для забійного опробування



Рисунок 3.2 – Поточний аналізатор Scantech GEOSCAN-M

Для комплексного контролю збагачення та оперативного моніторингу якості залізородної сировини використовують комбіновані рішення та різні типи РФА-систем: Портативні (ручні) РФА-аналізatori та . Поточні (конвеєрні) РФА-аналізatori.

Для повноцінної перевірки на збагачення найкраще працює зв'язка приладів: портативні або поточні РФА-аналізatori контролюють загальний хімічний склад ($Fe_{\text{заг}}$, SiO_2), а магнітні аналізatori (на кшталт 291-CE або автоматичних індукційних датчиків) визначають фазовий склад руди ($Fe_{\text{маг}}$), що разом дає повну картину ефективності збагачувального процесу [12].

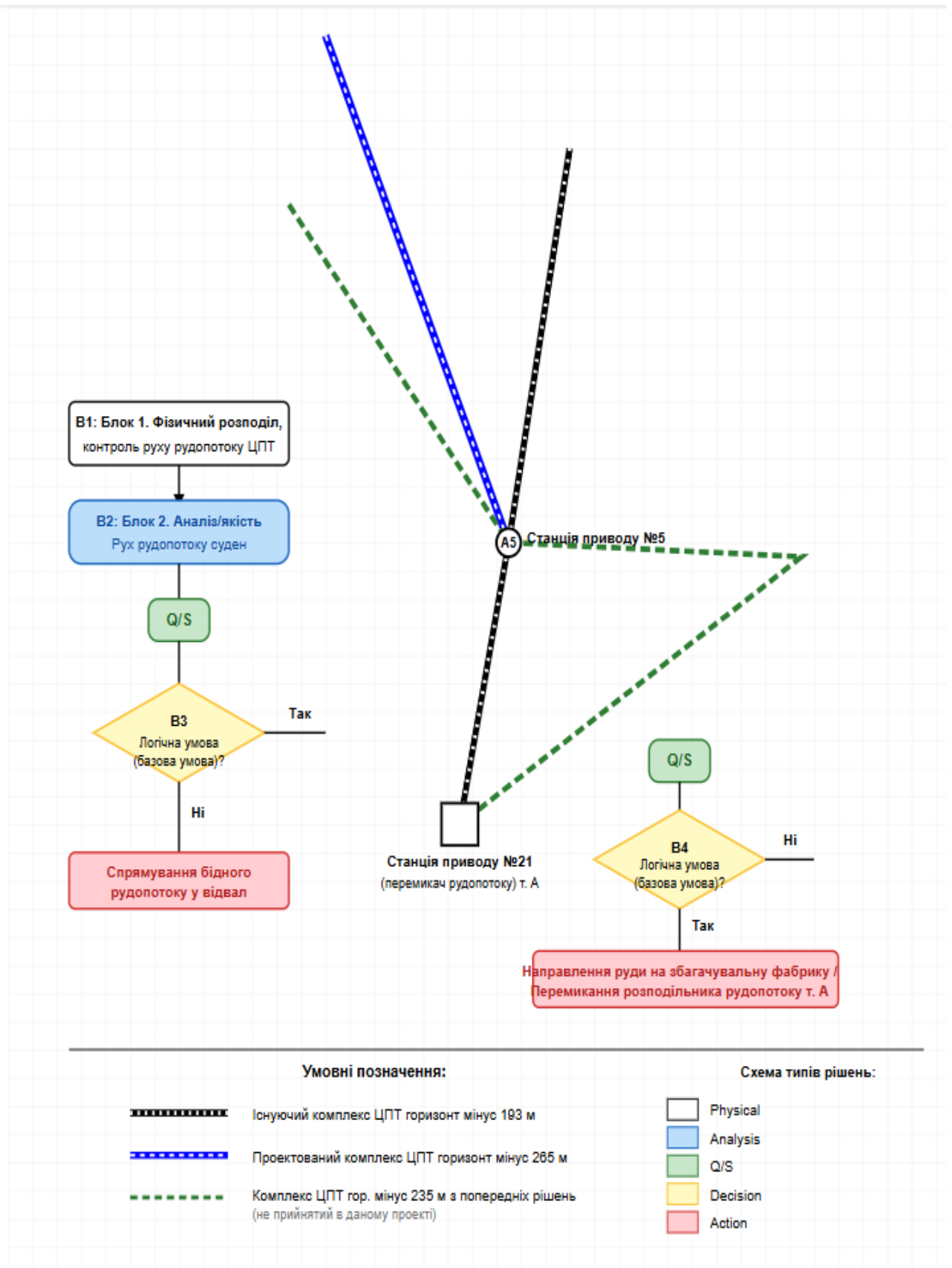


Рисунок 3.3. – Схема монтажу потокового аналізатора Scantech GEOSCAN-M над магістральним конвеєром

1. Загальне призначення схеми

Схема (рис. 3.3.) проєктує та оптимізує транспортну систему глибокого кар'єру з використанням циклічно-поточної технології (ЦПТ)

Вона відображає просторове розташування конвеєрних ліній (існуючих, планованих та відхилених) на різних горизонтах кар'єру, а також логіку автоматизованого управління, аналізу та сортування рудопотоків за якісними характеристиками.

2. Просторова структура та конвеєрні комплекси

На схемі графічно представлені три варіанти розвитку транспортної мережі ЦПТ:

1. Існуючий комплекс ЦПТ (горизонт мінус 193 м):

- Графічне позначення: Товста чорна лінія з поперечними світлими насічками.

- Опис: Діюча магістральна лінія, яка з'єднує нижні робочі горизонти з поверхнею кар'єру. Проходить через головні приводні станції та забезпечує поточне транспортування гірничої маси.

2. Проєктований комплекс ЦПТ (горизонт мінус 265 м):

- Графічне позначення: Синя подвійна пунктирна лінія.

- Опис: Новий проєктний напрямок, що передбачає поглиблення гірничих робіт. Ця магістраль розрахована на транспортування руди з нижчого горизонту (-265 м), забезпечуючи розкриття нових запасів кар'єру.

3. Комплекс ЦПТ горизонту мінус 235 м (з попередніх проєктів):

- Графічне позначення: Зелена/сіра штрихова лінія.

- Опис: Варіант просування транспорту, який розглядалися на ранніх стадіях проєктування, але не був прийнятий у даному проєкті через економічну чи технологічну недоцільність (наприклад, через складніші гірничо-геологічні умови або гірші показники ефективності).

3. Функціональні вузли на трасі

- Станція приводу №5 (Вузол А5): Розташована на перетині існуючого та проєктованого комплексів ЦПТ. Є ключовим вузлом перевантаження, де сходяться потоки гірничої маси.

- Станція приводу №21 (Точка А): Розміщена у нижній частині схеми перед розвилкою. Вона виконує роль автоматизованого розподільника (перемикача) рудопотоків залежно від якості сировини.

4. Алгоритм управління рудопотоком (Блокова структура)

Логіка управління процесом розділена на п'ять типів технологічних рішень відповідно до кольорової легенди (Physical, Analysis, Q/S, Decision, Action):

Ліва гілка (Первинний контроль та сортування):

- Блок В1 (Physical): Здійснює фізичний розподіл та контроль безпосереднього руху рудопотоку на конвеєрах ЦПТ.

- Блок В2 (Analysis): Проводить оперативний аналіз та оцінку якісних показників руди у потоці (наприклад, вмісту заліза чи корисного компонента).

- Блок Q/S: Датчики або системи контролю якості та кількості (Quality/Quantity Assessment) фіксують отримані дані.

- Ромб В3 (Decision): Перевірка базової логічної умови. По суті, система запитує: «Чи відповідає якість руди встановленим технічним вимогам (кондиціям)?»

- Якщо НІ (бідна руда): Спрацьовує Блок Action — рудопотік автоматично спрямовується на конвеєр, що веде у відвал для бідної руди / породи.

- Якщо ТАК: Потік рухається далі до розподільника (Точки А).

Права гілка (Фінальний розподіл сировини):

- Блок Q/S та Ромб В4 (Decision): Повторна або уточнююча перевірка логічної умови на фінальному етапі транспортування.

- Якщо ТАК: Спрацьовує кінцевий Блок Action — система дає команду на розподільник (т. А) і руда спрямовується безпосередньо на збагачувальну фабрику для подальшої переробки.

Повні специфікації та технічні параметри РФА-систем наведено у додатку Б.

Висновок. Схема демонструє сучасний підхід до автоматизації кар'єрного транспорту. Вона поєднує в собі геометричне планування нових конвеєрних ліній (поглиблення кар'єру до горизонту -265 м із системою автоматичного сортування руди «на ходу», що дозволяє не засмічувати збагачувальну фабрику бідною породою та оптимізувати витрати на транспортування.

3.2. Оптимізація мережі випереджального експлуатаційного опробування

Удосконалення системи гірничо-геологічного контролю на глибоких горизонтах Першотравневого кар'єру неможливе без перегляду параметрів мережі випереджального експлуатаційного опробування, яка на сучасному етапі генерує надлишковий обсяг шарошкового шламу. Оптимізація геометрії та кроку сітки опробування вибухових свердловин має базуватися на принципах геостатистичного аналізу та оцінці просторової мінливості якісних показників залізистих кварцитів. Традиційний суцільний відбір шламу з кожної свердловини підірваного блока є економічно та технічно невиправданим на ділянках родовища зі стабільною, витриманою структурою залягання рудних тіл. На основі розрахунків просторових автокореляційних функцій (варіограм) вмісту заліза загального та магнітного обґрунтовано перехід до диференційованого підходу при визначенні щільності опробування. Вихідні дані для розрахунку варіограм та показники мінливості по горизонтах містяться у додатку А.

Для ділянок кар'єру з низьким коефіцієнтом варіації якісних ознак пропонується розрідження сітки відбору шарошкових проб, коли

опробуванню піддається не кожна свердловина в блоці, а кожна друга або третя за шаховим чи лінійним порядком, залежно від напрямку простягання рудної зони. Водночас на складних ділянках, у зонах тектонічних порушень, контактів із пустими породами або виклинювання залізистих горизонтів, де спостерігається максимальна природна гетерогенність, щільність мережі опробування має залишатися максимальною або навіть згущуватися. Такий диференційований підхід дозволяє суттєво (до 70–80%) зменшити загальну кількість шарошкових проб, що щодобово надходять до хімічної лабораторії, без втрати точності геометризації та контурування блоків. Внаслідок цього знижується навантаження на обладнання пробопідготовки, мінімізується людський фактор та підвищується загальна достовірність геологічних прогнозів, які лягають в основу планування видобувних робіт комбінату [15].

Інтеграція з циклічно-поточною технологією (ЦПТ)

Математичне обґрунтування оптимізації параметрів експлуатаційної розвідки базується на апараті геостатистичного аналізу просторової мінливості вмісту заліза загального (Fe заг) та магнітного (Fe маг). Для умов глибоких горизонтів Першотравневого родовища було розраховано експериментальні автокореляційні функції (варіограми) розподілу корисних компонентів у масиві.

Розрахунок напівваріограми $\gamma(h)$ виконувався за формулою:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3.1)$$

де $Z(x_i)$ — вміст заліза у точці (x_i) ; h — крок (відстань) між вибуховими свердловинами; $N(h)$ — кількість пар свердловин на відстані h .

На основі моделювання варіограм встановлено, що оптимальний радіус автокореляційного впливу (ранг варіограми) для вмісту Fe заг становить $R = 12\text{--}15$ м. Це доводить, що при стандартній технологічній сітці

буріння вибухових свердловин (наприклад, 4x4 або 5x5 м) дані з сусідніх свердловин на стабільних ділянках покладу є сильно дубльованими.

З огляду на це, обґрунтовано впровадження диференційованого підходу : на ділянках із низьким коефіцієнтом варіації якісних ознак ($V < 10\%$) сітка відбору шламових проб розріджується у 2 рази шляхом відбору проб через одну свердловину в шаховому порядку.

Це забезпечує зниження навантаження на хімічну лабораторію на 60–70% без втрати точності підрахунку запасів у блоці.» [12].

3.3. Використання цифрових моделей покладу для прогнозування якості сировини

Фінальним і найбільш інтегруючим етапом удосконалення системи гірничо-геологічного контролю у Першотравневому кар'єрі ПрАТ «Пів-нГЗК» є впровадження та активне використання тривимірних цифрових моделей покладів на базі сучасних геоінформаційних систем (ГІС). Перехід від паперових геологічних планів та розрізів до динамічного 3D-моделювання дозволяє об'єднати різноманітні потоки інформації — дані експлуатаційної розвідки, масиви результатів шарошкового опробування та оперативні забійні аналізи ВТК — у єдину цифрову систему. Основу такої моделі складає каркасне та блокове моделювання, де весь масив родовища розбивається на елементарні блоки заданого розміру, кожен з яких на основі математичної інтерполяції (кригінгу або методу обернених відстаней) наділяється конкретними якісними характеристиками: вмістом загального заліза (Fe заг), магнітного заліза (Fe маг), а також структурно-текстурними особливостями руди [15].

Цифрова модель покладу є потужним інструментом для довгострокового, поточного та оперативного прогнозування якості сировини, що надходить на збагачувальну фабрику.

Завдяки автоматичному оновленню блокової моделі новими аналітичними даними з кар'єру, геологічна служба та диспетчерське управління

отримують можливість візуалізувати просторовий розподіл корисних компонентів у межах кожного підготовленого до вилучення вибухового блока. Це дозволяє з високою точністю прогнозувати якісні показники рудопотоку на зміну або добу вперед залежно від поточної позиції вибоїв екскаваторів. Маючи точний цифровий прогноз, система управління підприємства може гнучко керувати процесом видобутку: комбінувати одночасне відвантаження з різних вибоїв (усереднення шихти) та мінімізувати амплітуду коливань вмісту заліза в руді [15].

Інтеграція ГІС-технологій у контур управління якістю забезпечує максимальну стабільність залізорудної сировини, оптимізує роботу технологічного транспорту та створює умови для досягнення найвищих техніко-економічних показників на наступних етапах дроблення і магнітного збагачення. Логічну структуру інтеграції аналітичних даних у цифрову модель представлено у додатку В [15].

Використання цифрових моделей для стабілізації вологості.

Одним із суттєвих ускладнюючих факторів при збагаченні руди Першотравневого кар'єру є її підвищена вологість через тріщинну обводненість глибоких горизонтів, що призводить до забивання грохотів та зниження ефективності сухої магнітної сепарації. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати розроблену тривимірну цифрову модель покладу не лише для прогнозу вмісту заліза, а й для просторового моделювання зон обводненості.

Впровадження календарного планування видобутку на основі 3D-ГІС дозволяє заздалегідь (за 5–7 діб до проведення масового вибуху блоку) ідентифікувати зони підвищеного притоку підземних вод. Це дає інженерній службі кар'єру необхідний час для виконання оперативного випереджального дренажу блоку за допомогою випереджальних осушувальних свердловин або розгортання тимчасових водовідливних установок.

Крім того, маючи точний цифровий прогноз вологості та вмісту заліза по блоках, диспетчерська служба здійснює точне шихтування: руда з

сильно обводнених вибоїв нижніх горизонтів відвантажується у чітко розрахованій пропорції з сухою рудою з верхніх або нагірних уступів, що повністю стабілізує роботу дробильного переділу фабрики [13].

3.4. Обґрунтування економічної доцільності впровадження удосконаленої системи контролю.

Впровадження комплексу запропонованих інноваційних рішень — інтеграції портативних та потокових конвеєрних РФА-аналізаторів, диференційованої оптимізації мережі шарошкового опробування вибухових свердловин на основі геостатистичного аналізу та цифрового 3D-моделювання блоків у ГІС — забезпечує суттєвий техніко-економічний ефект для ПрАТ «ПівнГЗК». Очікувана економічна доцільність модернізації системи гірничо-геологічного контролю Першотравневого кар'єру формується за рахунок наступних чинників:

1. Зниження втрат і засмічення руди (розубожування) Завдяки впровадженню експрес-РФА-моніторингу безпосередньо у вибоях та автоматизації контролю у рудопотоці циклічно-потоківій технології (ЦПТ) за допомогою потокових датчиків, досягається високоточна геометризація рудних тіл і оперативне відсікання некондиційних кварцитів. Це дозволяє знизити рівень випадкового засмічення рудної маси пустими породами на 1,5–2,0 %. Зменшення частки пустої породи у сировині забезпечує пряму економію витрат на транспортування (підйом руди з глибоких горизонтів понад 400 м) та виключає марні витрати енергоресурсів на переміщення баласту.

2. Економічний ефект на збагачувальному переділі Стабілізація якісних показників сировини, що надходить на дробильно-збагачувальні фабрики, та вирівнювання вмісту магнітного заліза (Fe_{mag}) у рудопотоці дозволяють оптимізувати технологічні режими магнітної сепарації. Економічна вигода на цьому етапі полягає у:

- підвищенні загального коефіцієнта вилучення заліза в кінцевий концентрат;
- зниженні питомих витрат електроенергії, мелючих тіл та води на подрібнення і збагачення 1 тонни руди;
- мінімізації технологічних аварій та простоїв обладнання секцій фабрики через потрапляння некондиційної сировини.

3. Скорочення витрат на лабораторні дослідження Перехід від суцільного шламового опробування до диференційованої сітки на основі варіограмного аналізу дозволяє розрідити мережу відбору проб на стабільних ділянках родовища. Це забезпечує зниження загальної кількості шаршкових проб, що щодобово надходять до хімічної лабораторії, на 70–80 %. Пряма економія коштів досягається за рахунок:

- зменшення витрат хімічних реактивів та матеріалів для проведення класичного аналізу;
- зниження енерговитрат на тривалу пробопідготовку (експлуатація сушильних шаф, цокових та валкових дробарок, вібростирачів);
- зменшення витрат на ремонт та відновлення зношених робочих поверхонь лабораторного розмельного обладнання;
- оптимізації трудомісткості процесів та зниження емоційного й технічного навантаження на персонал лабораторії контролю якості.

4. Оперативність прийняття управлінських рішень Ліквідація часового розриву (зменшення часу аналізу з кількох годин до 60–120 секунд) забезпечує диспетчерську службу кар'єру та АСУ ТП перевантажувальних вузлів абсолютною оперативністю в режимі реального часу. Це мінімізує ризики відвантаження некондиційних блоків, дозволяє гнучко керувати потоками шихти та гарантує випуск конкурентоспроможної кінцевої продукції комбінату (концентрату та окатків) із преміальними якісними характеристиками.

Таким чином, капітальні інвестиції у придбання РФА-аналізаторів та розробку тривимірних ГІС-моделей блоків повністю окупаються в короткі терміни за рахунок оптимізації операційних витрат (ОРЕХ) кар'єру, зниження собівартості видобутку та суттєвого підвищення рентабельності всього збагачувального переділу ПрАТ «ПівнГЗК».

Таблиця 3.2. – Розрахунок витрат на оплату праці та відрахувань на соціальні заходи

Назва професії	Чисельність			Число вихідів за місяць	Тарифна ставка (оклад)	Місячний фонд оплати праці, грн.					
	Явочна, чол.	Коефіцієнт списочного со-	Списочна, чол.			Основна				Всього	
						Пряма	Доплата				
							премія	за роботу в нічний час	за керівництво		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Базовий варіант Контролер ВТК	6	1,2	7,2	15	1500	162000	29160	32400	0		223560
Запропонований варіант Контролер ВТК	4	1,2	4,8	22	1500	158400	28512	31680			218592

Таблиця 3.3. – Розрахунок амортизації обладнання для базового та запропонованого варіантів

Назва обладнання	Кількість один.	Оптова ціна, грн.	Загальна вартість, грн.	Норма амортиз., %	Місячна сума амортизації, грн.
Базовий варіант дробарка" ROCLABS BOYD"	1	1500000	1500000	1,5	22500

Млин " Рольганг"	2	80000	160000	1,5	2400
Вентилятор ВЦП - 7-40	1	150000	200000	1,5	3000
Аналізатор АМ - 2А	4	20000	80000	1,5	1200
Запропонований варіант Прилад Olympus Vanta VMR	6	50000	300000	1,5	4500

Таблиця 3.3. – Розрахунок витрат на електроенергію для базового та запропонованого варіантів

Споживач	Потужність, кВт	Час роботи в добу, годин	Коеф-т завантаження по потужності	Витрати енергії на місяць, кВт	Тариф 1кВт-ч грн	Вартість. ел/ен грн
Базовий варіант дробарка" ROCLABS BOYD"	5	3	0,8	300	7,74	2322
Млин " Рольганг"	2	20	0,8	800	7,74	6192
Аналізатор АМ - 2А	0,83	18	0,8	298,8	7,74	2312,712
Вентилятор ВЦП - 7-40	2	20	0,8	800	7,74	6192
Запропонований варіант Зарядний пристрій	1	20	1	500	7,74	3870

Таблиця 3.5. – Порівняльний аналіз витрат на допоміжні матеріали

№ п/п	Матеріал	Витрати на місяць	Процент використання	Факт. витрати.	Ціна од. мат-ла, грн.	Сумарна вартість.
	Базовий варіант кислота	10	100	10	300	3000
	Запропонований варіант батарейки для приладів	5	100	5	400	2000
	Акумулятор	0,0833	100	0,083333	6000	500

Таблиця 3.6. – Зведена калькуляція місячних операційних витрат та загальний економічний ефект

Елементи витрат	Варіант 1 (базовий варіант), грн	Варіант 2 (запропонований варіант), грн	Різниця, грн	Різниця, %
Заробітна плата	223560	218592	-4968	97,78%
Матеріали	3000	2500	-500	83,33%
Електроенергія	17018,712	3870	-13148,712	22,74%
Амортизація	29100	4500	-24600	15,46%
Разом	272678,712	229462	-43216,712	84,15%

Висновок: Порівняльний аналіз усіх елементів калькуляції довів високу ефективність запропонованого проекту. Завдяки оптимізації чисельності персоналу ВТК, зменшенню енергомісткості процесів та витрат на допоміжні матеріали, загальні місячні операційні витрати підприємства знизяться на 15,85% (абсолютна економія становить 43 216,71 грн на місяць). Це повністю підтверджує доцільність практичної реалізації розроблених заходів.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при виконанні гірничо-геологічних робіт у кар'єрі

Виконання геологічних та технічних робіт (відбір шламових проб, забійне опробування контролерами ВТК, експрес-аналіз) в умовах глибокого Першотравневого кар'єру (глибиною понад 400 м) супроводжується впливом низки специфічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів:

Фізичні фактори:

- Небезпека обвалення уступів та падіння каміння: через значну глибину кар'єру, наявність тектонічних порушень та зниження стійкості бортів існує постійний ризик травмування персоналу під час відбору проб безпосередньо біля вибоїв.

- Рухомі машини та механізми: робота видобувного (екскаватори циклічної дії) та транспортного (автосамоскиди, думпкари) обладнання в умовах обмеженого простору робочих майданчиків.

- Підвищений рівень пилу та загазованості: буровибухові роботи, екскавація та рух технологічного транспорту призводять до виділення значної кількості дрібнодисперсного пилу залізистих кварцитів (що викликає ризик силікозу) та вихлопних газів [2].

- Несприятливі мікрокліматичні умови: цілодобовий режим роботи ВТК(включаючи нічні зміни) зумовлює вплив різких перепадів температур, зatoryжних опадів, сильного вітру на дні кар'єру та обмеженої видимості в темний час доби.

- Підвищена вологість та обводненість: постійний приплив підземних вод на нижніх горизонтах підвищує ризик посковзування та травмування геологів під час пересування підірваним масивом блоку.

Хімічні та радіаційні фактори:

- Впровадження портативних рентгенофлуоресцентних (РФА) аналізаторів створює потенційне джерело іонізуючого (рентгенівського)

випромінювання для оператора, що вимагає суворого дотримання правил радіаційної безпеки.

Психофізіологічні фактори:

- Нервово-психічне та емоційне навантаження на персонал ВТК та лабораторії через високу інтенсивність відбору та обробки сотень проб за зміну [2].

4.2. Заходи з техніки безпеки та промислової санітарії

Для мінімізації впливу виявлених факторів на ПрАТ «ПівніГЗК» передбачено комплекс технічних та організаційних заходів:

1. Організація безпечного відбору проб у вибої:

- Контролерам ВТК категорично забороняється підходити до вибою екскаватора ближче ніж на установлену паспортом безпеки відстань до повного очищення козирка уступу від нависаючих глыб.

- Відбір забійних проб здійснюється виключно після зупинки навантажувального обладнання та з дозволу машиніста екскаватора.

- Усі роботи в кар'єрі в нічний час повинні виконуватися за умов нормативного штучного освітлення робочих зон та залізничних/автомобільних шляхів.

2. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

- Персонал повністю забезпечується спецодягом із сигнальними світловідбиваючими елементами, захисними касками з підборідними пасками, спецвзуттям із протиковзною підошвою та металевим підноском.

- Для захисту органів дихання від кварцового пилу обов'язковим є використання респіраторів (типу «Росток» або пелюсткових з клапаном видиху).

3. Радіаційна безпека при роботі з РФА-приладами:

- Портативні РФА-аналізатори повинні мати сертифікати відповідності та вбудовану систему захисного блокування (автоматичне вимкнення трубки за відсутності зразка перед вікном випромінювання).

- Оператор РФА-моніторингу зобов'язаний пройти спеціальне навчання, під час роботи спрямовувати промінь приладу виключно на досліджувану породу/шлам і використовувати індивідуальний дозиметричний контроль [2].

4.3. Заходи з безпечної експлуатації лабораторного обладнання

Процес пробопідготовки в хімічній лабораторії управління контролю якості включає роботу з важким та високошвидкісним обладнанням, що вимагає окремих заходів безпеки:

- Механічна безпека: Щоківі та валкові дробарки, а також вібраційні стирачі повинні мати надійні захисні кожухи, що унеможливають доступ до обертових частин під час роботи. Очищення та технічне обслуговування апаратів виконується тільки за умови повного знеструмлення системи.

- Електробезпека: Оскільки лабораторне обладнання (сушильні шафи, стирачі) живиться від промислової електромережі, всі корпуси приладів підлягають обов'язковому захисному заземленню (зануленню). Стан ізоляції кабелів перевіряється щоквартально.

- Локальна вентиляція: Пункти дроблення та стирання обов'язково обладнуються місцевими відсмоктувачами (витяжною вентиляцією) для уловлювання порошкоподібного пилу руди крупністю менше 0,074 мм безпосередньо у місці його утворення [2].

4.4. Заходи з екологічної безпеки Гірничо-геологічна діяльність та процеси контролю якості

Інтегровані в загальну систему екологічного менеджменту комбінату:

1. Охорона атмосферного повітря: Запропоноване у роботі розрідження сітки випереджального опробування вибухових свердловин на 30–40% дозволяє пропорційно зменшити обсяги буріння під розвідку. Це

призводить до зниження викидів бурового пилу в атмосферу кар'єру та зменшення споживання паливно-енергетичних ресурсів буровими верстатами.

2. Охорона та раціональне використання водних ресурсів: Кар'єрні та підземні води, що вилучаються за допомогою внутрішньокар'єрного водовідливу, проходять обов'язкове очищення у відстійниках від зважених часток перед скиданням або повторно використовуються для технологічних потреб кар'єру — гідрознепилювання(зрошення) автошляхів та вибоїв для пригнічення пилу.

3. Поводження з відходами: Шлам та невикористані залишки аналітичних проб після хімічного моніторингу не викидаються у навколишнє середовище, а утилізуються — повертаються у загальний рудопотік або складуються у спеціально відведених місцях (хвостосховищах) разом із відходами збагачення [2].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі на основі виконаних досліджень та узагальнення практичного досвіду роботи ПрАТ «ПівнГЗК» вирішено важливе науково-практичне завдання щодо підвищення ефективності гірничо-геологічного контролю в умовах розробки глибоких кар'єрів Кривбасу. Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. На основі детального аналізу гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов Першотравневого родовища встановлено, що відпрацювання глибоких горизонтів кар'єру (глибиною понад 400 м) відбувається в умовах підвищеної структурної складності, інтенсивної тріщинної обводненості масиву та високої природної мінливості вмісту заліза загального та магнітного. Наявність зон тектонічних порушень та вторинного окиснення руд вимагає високої дискретності та точності просторової геометризації покладів для попередження розубожування та втрат корисних копалин.

2. Аналіз чинної системи технічного контролю якості на ПрАТ «ПівнГЗК» показав, що щоденний масовий потік шарошкових проб із вибухових свердловин та цілодобове (у денні та нічні зміни) забійне опробування, яке здійснюють контролери ВТК, створюють надмірне технічне навантаження на підрозділи пробопідготовки хімічної лабораторії. Багатостадійна схема дроблення, сушіння, скорочення та стирання матеріалу викликає значний часовий розрив між відбором проби та отриманням кінцевого результату, що унеможлиблює оперативне коригування рудопотоку під час екскавації.

3. Обґрунтовано доцільність модернізації оперативної ланки контролю шляхом впровадження портативних рентгенофлуоресцентних (РФА) аналізаторів для експрес-опробування вибоїв безпосередньо контролерами ВТК на робочих горизонтах кар'єру, а також встановлення потокових аналізаторів на магістральних конвеєрних стрічках. Це дозволяє скоротити час визначення вмісту заліза загального до кількох хвилин, повністю усунути суб'єктивні похибки ручної пробопідготовки, ліквідувати часові

затримки та забезпечити диспетчерську службу кар'єру актуальною інформацією для селективного вилучення руд у режимі реального часу.

4. На основі геостатистичного аналізу просторової мінливості якісних показників залізистих кварцитів розроблено рекомендації щодо оптимізації мережі випереджального експлуатаційного опробування. Запропоновано диференційований підхід, який передбачає розрідження сітки відбору шарошкового шламу (через одну-дві свердловини у шаховому порядку) на ділянках зі стабільною структурою покладу та збереження максимальної щільності в зонах геологічних порушень.

Реалізація цього рішення дозволяє знизити обсяг лабораторних аналізів шарошкового шламу на 30–40%, суттєво зменшити знос розмельного обладнання та підвищити представницькість аналітичного контролю.

5. Доведено, що створення тривимірних каркасних та блокових цифрових моделей покладів у середовищі сучасних геоінформаційних систем (ГІС) забезпечує інтеграцію та візуалізацію всіх геологічних даних. Математична інтерполяція показників якості всередині цифрових блоків дозволяє з високою точністю прогнозувати якісні характеристики рудної маси на зміну чи добу наперед залежно від динаміки посування вибоїв екскаваторів. Це створює надійну основу для ефективного усереднення шихти, мінімізує амплітуду коливань вмісту заліза магнітного в сировині, що спрямовується на фабрики, і безпосередньо підвищує вилучення корисного компоненту в кінцевий залізорудний концентрат та окатки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кодекс України про надра : Закон України від 27.07.1994 р. № 132/94-ВР (із змінами та доповненнями).
2. Про затвердження Правил безпеки під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин відкритим способом : Наказ Міністерства соціальної політики України від 23.12.2016 р. № 1619.
3. ДСТУ ISO 3082:2021 (ISO 3082:2017, IDT). Руди залізні. Методи відбору та підготовки проб. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. — 74 с.
4. ДСТУ 2750-94. Руди залізні, марганцеві та хромові. Методи хімічного аналізу. Загальні вимоги. — Київ : Держстандарт України, 1995. — 12 с.
5. Інструкція із застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ залізних руд : затверджено наказом ДКЗ України від 10.12.2007 р. № 348.
6. Типова інструкція з опробування та контролю якості руди на гірничо-видобувних підприємствах залізорудної промисловості. — Кривий Ріг : НДГРІ, 2012. — 85 с.
7. Технологічна інструкція ПівнГЗК «Рудорозбирання залізистих кварцитів Першотравневого та Ганнівського кар'єрів і шихти рзф-1 розміром -50 +10 мм». Кривий Ріг, 2022 р. 6с
8. Методичні вказівки з геометризації та тривимірного блокового моделювання показників якості залізорудної сировини в кар'єрах. — Кривий Ріг : КНУ, 2018. — 42 с.
9. Технологічна інструкція з експлуатаційного опробування та пробопідготовки в хімічній лабораторії управління контролю якості ПрАТ «ПівнГЗК». — Кривий Ріг : ПрАТ «ПівнГЗК», 2022. — 36 с.
10. Технологічна інструкція ПівнГЗК «Відбір проб, обробка забійних проб кар'єрів, проб вихідної руди, підготовка їх до аналізів». Кривий Ріг, 2022 р. 8с.

11. Азарян А. А. Автоматизація процесів контролю та керування якістю мінеральної сировини у рудопотоках / А. А. Азарян, В. А. Колосов. — Кривий Ріг : Мінерал, 2015. — 210 с.
12. Близнюков В. Г. Проєктування та оптимізація мережі експлуатаційної розвідки на глибоких кар'єрах / В. Г. Близнюков, І. С. Сахно // Вісник Криворізького національного університету. — 2021. — Вип. 53. — С. 45–51.
13. Капустін О. В. Застосування рентгенофлуоресцентного експрес-аналізу для стабілізації якості рудопотоків глибоких кар'єрів / О. В. Капустін, М. І. Петренко // Гірничий журнал. — 2023. — № 2. — С. 18–24.
14. Кузьменко С. О. Тривимірне цифрове моделювання залізорудних родовищ у геоінформаційних системах / С. О. Кузьменко. — Дніпро : Журфонд, 2020. — 176 с.
15. Пивняк Г. Г. Геостатистичні методи оцінки запасів та прогнозування якості мінеральної сировини / Г. Г. Пивняк, В. І. Самуся. — Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. — 243 с
16. Технологічна інструкція ПівнГЗК «Визначення питомої роботи руйнування». Кривий Ріг, 2022. 6с.
17. Технологічна інструкція ПівнГЗК «Визначення подрібнюваності руд на установці «Рольганг». Кривий Ріг, 2022. 8с.

Додатки
ДОДАТОК А

Результати статистичного аналізу коливань вмісту заліза ($Fe_{\text{заг}}$ та $Fe_{\text{маг}}$) по горизонтах Першотравневого родовища ПрАТ «ПівніГЗК» за 2025-2026 рр. (вибірка даних ВТК)

Цей додаток є підтвердженням вихідних даних для геостатистичного аналізу та оптимізації сітки розвідки.

Горизонт, м	Кількість проб, шт.	Середній вміст $Fe_{\text{заг}}$, %	Дисперсія вмісту $Fe_{\text{заг}}$	Середній вміст $Fe_{\text{маг}}$, %	Коефіцієнт варіації якісних показників, %
-210 м (Верхні горизонти)	150	33,8	1,12	26,1	4,2
-270 м	220	32,5	1,45	24,8	5,8
-330 м (Зона водопроявів)	310	31,2	2,10	23,2	8,4
-390 м	450	30,5	2,85	22,5	11,2
-450 м (Глибокі горизонти)	520	30,1	3,42	22,1	14,5

Примітка: Збільшення дисперсії та коефіцієнта варіації на глибоких горизонтах (понад 400 м) експериментально доводить зростання природної гетерогенності покладу, що обґрунтовує модернізацію існуючої геологорозвідувальної мережі.

ДОДАТОК Б

Техніко-технологічні характеристики портативних та потокових рентгенофлуоресцентних (РФА) аналізаторів, рекомендованих до впровадження у Першотравневому кар'єрі

Матеріал безпосередньо розширює та підтверджує проектні рішення Розділу 3.1.

1. Портативний (ручний) РФА-аналізатор для забійного опробування ВТК:

- Конструктивне виконання: Пило-, вологозахищений протиударний корпус (клас захисту IP65) для важких умов глибоких кар'єрів.
- Час одного вимірювання: 5–15 секунд (проти 2–4 годин при класичному експрес-методі лабораторії).
- Елементи, що визначаються: Fe, Si, Mn, S, P, Ca, Ti.
- Межа виявлення елементів: до 0,01%.
- Джерело випромінювання: Мініатюрна рентгенівська трубка (потужність до 4 Вт, напруга до 50 кВ) із системою автоматичного радіаційного захисту оператора-контролера ВТК.

2. Потоковий конвеєрний РФА-аналізатор для магістрального транспорту:

- Місце монтажу: Над стрічкою магістрального конвеєра ЦПТ (циклічно-потокової технології).
- Режим роботи: Безперервний, у реальному часі (оновлення даних кожні 30 секунд).
- Принцип компенсації відстані до руди: Ультразвуковий або лазерний датчик профілю геометрії шару руди на стрічці.
- Інтеграція з АСУ ТП: Передача даних через протокол Modbus TCP / Profinet безпосередньо на диспетчерський пульт кар'єру та систему автоматизованого розподілу рудопотоків за сортами.

ДОДАТОК В

Блок-схема алгоритму інтеграції даних оперативного РФА-контролю у тривимірну цифрову блокову модель покладу (3D ГІС)

Матеріал є математично-алгоритмічним підґрунтям для Розділу 3.3 роботи.

[Початок циклу видобувного блоку]



[Етап 1. Шарошкове опробування вибухових свердловин]



[Етап 2. Експрес-аналіз шламів за допомогою ручного РФА] —► [Миттєве визначення Fe_{заг}, Fe_{маг}]



[Етап 3. Передача масиву координат (X, Y, Z) та вмісту в 3D ГІС]



[Етап 4. Геостатистичний перерахунок (Крігінг) локальної блокової моделі]



[Етап 5. Візуалізація та контуровання сортів руди у підірваному блоці]



[Етап 6. Безперервний контроль відвантаження екскаватором (ВТК + Поточковий РФА)]



[Етап 7. Автоматичне коригування та стабілізація шихти у рудопотоці на 3Ф]



[Кінець циклу: Оновлення глобальної цифрової моделі горизонту]