

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ

ТОКАР МАКСИМ ЮРІЙОВИЧ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ РУДИ НА ОСНОВІ  
ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВІДКРИТОЇ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ  
РОДОВИЩ

184 “Гірництво”

ВПП «Відкриті гірничі роботи»

Керівник Слободянюк В.К. / \_\_\_\_\_ /

Завідувач кафедри Жуков С.О. / \_\_\_\_\_ /

Кривий Ріг

2024

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП   | 5  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ І ПЛАНУВАННЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ НА КАР'ЄРАХ  | 8  |
| 1.1. Динаміка гірничих робіт залізорудних кар'єрах  | 8  |
| 1.2 Досвід використання гірничо-геологічних систем для проектування і планування гірничих робіт на залізорудних кар'єрах  | 15 |
| 1.3 Висновки за розділом 1  | 28 |
| РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ГЕОЛОГО-МІНЕРАЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА СТАБІЛЬНУ РОБОТУ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ В РЕЖИМІ УСЕРЕДНЕННЯ ЯКОСТІ РУДИ | 32 |
| 2.1. Вплив коливань якісних показників на стабільну роботу комбінату.   | 32 |
| 2.2. Висновки за розділом 2   | 43 |
| РОЗДІЛ 3.ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАНУВАННЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ ЗА РАХУНОК ПОДІЛУ РУД ЗА ЇХ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ.  | 44 |
| 3.1 Геометризація якості корисних копалин у надрах  | 45 |
| 3.2 вплив гірничих робіт на коливання якості корисних копалин   | 53 |
| 3.3 Висновки за розділом 3  | 69 |
| Розділ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ РУДИ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВІДКРИТОЇ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ                       | 70 |
| 4.1 Сучасні методи імітаційного моделювання   | 70 |
| 4.2 Базові принципи обґрунтування оптимального режиму роботи ГЗК  | 73 |
| 4.3 Система імітаційного та параметричного моделювання гірничих робіт   | 77 |
| ВИСНОВКИ  | 82 |
| Список використаної літератури  | 83 |

## РЕФЕРАТ

Токар М.Ю. Підвищення ефективності управління якістю руди на основі імітаційного моделювання відкритої розробки залізородних родовищ. Випускна роб. На здобу осв. – квал. рівня магістра. Кривий Ріг. КНУ, 2024. 85 с.

Об'єкт дослідження – гірничі роботи на залізородних кар'єрах.

Предмет дослідження – методи управління якістю руди на залізородних кар'єрах.

Мета досліджень – підвищення ефективності управління якістю руди за рахунок удосконалення методів планування гірничих робіт на основі імітаційного моделювання.

Основна ідея магістрантської роботи полягає у використанні цифрових моделей родовищ та кар'єрів, геологічних та технологічних показників залізи-стих кварцитів для планування гірничих робіт з урахуванням виробництва концентрату з якістю, що відповідає поточним вимогам світового ринку залізородної сировини.

Під час виконання роботи вирішувалися наступні завдання:

- аналіз технології планування гірничих робіт на залізородних кар'єрах;
- аналіз вимог, що пред'являються гірничо-збагачувальним виробництвом до якості планування гірничих робіт та врахування при плануванні гірничих робіт комплексу технологічних характеристик руд;
- огляд методів автоматизованого проектування та планування гірничих робіт на залізородних кар'єрах України;
- розробка рекомендацій з підвищення ефективності управління якістю руди на основі імітаційного моделювання відкритої розробки залізородних родовищ

Методи дослідження: систематизація, аналіз та узагальнення науково-технічної літератури, досвіду планування гірничих робіт з урахуванням якості

руди; техніко-економічний та статистичний аналіз роботи гірничо-збагачувального виробництва; економіко-математичне моделювання; імітаційне моделювання технологічних процесів відкритої розробки.

Основні результати роботи полягають в обґрунтуванні раціональної динамічної моделі геологічних та технологічних об'єктів для короткострокового планування гірничих робіт, обґрунтування необхідності ширшого використання при плануванні та проектуванні кар'єрів технологічних властивостей залізистих кварцитів, аналізі залежності змін техніко-економічних показників гірничо-збагачувального виробництва від напрямків розвитку гірничих робіт, в розробці рекомендацій з підвищення ефективності управління якістю руди на основі імітаційного моделювання відкритої розробки залізородних родовищ.

Робота складається зі вступу, 4 розділів та висновків. Робота викладена на 85 сторінках машинописного тексту, що містить 34 малюнків і список використаних джерел 28 найменувань.

Ключові слова: залізородний кар'єр, цифрова блочна модель родовища, місячний план гірничих робіт, гірничо-геологічне програмне забезпечення, автоматизоване планування гірничих робіт з урахуванням якості концентрату, металургія.

## ВСТУП

В останні роки з боку світових покупців залізорудної сировини спостерігається суттєвий рост вимог до її якості. Руйнування через російську агресію основних металургійних заводів України спричинило зниження внутрішнього попиту на залізорудну сировину та призвело до збільшення частки експорту на гірничозбагачувальних комбінатів. В той же час, в умовах сурової конкуренції для утримання позицій на світовому ринку треба суттєво зменшити собівартість виробництва концентрату та обкотишів.

Для забезпечення конкурентоспроможності на світовому ринку українська гірничозбагачувальна галузь потребує модернізації та реконструкції комбінатів (що можливо тільки після закінчення війни) та розробки та впровадження нових методів управління кар'єрами.

Одним з перспективних шляхів вдосконалення методів управління кар'єрами є збільшення ступеню вивченності надр, використання при плануванні гірничих робіт закономірностей розподілу в масиві якісних показників, розробка та впровадження більш ефективних методів усереднення руд.

Залізорудні кар'єри України мають низьку ступень використання економіко-математичних та оптимізаційних методів в плануванні гірничого виробництва. В гірничій промисловості ще не апробовані методи планування, які в повній мірі використовують технологічні можливості поточного стану надр і можливості гірничо-збагачувального виробництва.

Використання сучасних методів дослідження структури родовища та технологічних властивостей руд та методів оптимізації оперативних планів гірничозбагачувального виробництва дозволяє реалізувати системний пошук резервів гірничого виробництва на всіх рівнях керування гірничозбагачувальним комбінатом.

Вимоги суттєвого підвищення якості залізорудної сировини вже призвели до відходу кар'єрів від сталого режиму гірничих робіт. Збільшується діапазон коливань продуктивності кар'єрів та оперативних змін у поточному розвитку кар'єрів. Це вже призвело до потреби у більш частішому перегляду календарних планів розвитку кар'єрів, до корегування режиму гірничих робіт у том числі з метою вибору напрямків розвитку кар'єру, що забезпечують видобуток руди з більш високими технологічними властивостями. Таким чином, сучасні умови формують потребу у розробі багатоваріантних планів гірничих робіт з визначеним діапазоном зміни якісних показників руди.

Для забезпечення конкурентноспроможності кожний залізорудний гірничозбагачувальний комбінат повинен мати високий ступень геологічної виченості надр, ретельне обґрунтування проектних рішень з розвитку гірничих робіт, довгостроковий план розвитку та вдосконалення збагачувального виробництва та забезпечити суровий контроль за розробкою та реалізацією оперативних планів гірничих робіт згідно проекту. На мою думку, це забезпечить підвищення ефективності використання надр, зменшить втрати та збіднення корисної копалини. Відомо, що щоденне несуттєве відхилення від гірничого плану, невикористання оперативних можливостей зменшити втрати та збіднення руди впродовж зміни-добы-тижня призводять до створення ситуації коли збиткі від гірничого виробництва ставлять під сумнів можливість подальшої експлуатації кар'єру.

Якість концентрату залежить не тільки від режиму роботи збагачувальної фабрики, а в першу чергу від складу вихідного рудо потоку. В сучасній практиці відкритих гірничих робіт за кордоном важливим елементом керування якістю продукції є використання системі складів руди, які дозволяють розділити руду по різним складам за технологічними властивостями руди (наприклад, склад руди високої якості, склад руди низької якості тощо).

Широке впровадження на відчизнянних кар'єрах складів за градаціями якості руди дозволить вдосконалити кар'єрну рудопідготовку та підвищити якість концентрату до рівня світових стандартів. Напрямок розвитку гірничих робіт і послідовність відпрацювання екскаваторних блоків повинні враховувати сортність руди та забезпечувати оптимальне усереднення руд з врахуванням технологічних властивостей руд. Сучасні дослідження напрямку технологічна-мінералогія можуть бути використані в новітніх методиках оптимізації режиму гірничих робіт, а також при плануванні. Змішування руд без врахування їх мінералого-технологічних та петрографічних особливостей при шихті підвищує неконтрольовані коливання показників збагачення руди. Нові методики та подальші дослідження в цьому напрямку дозволяють говорити про оптимізацію втрат і можливість покращення якісних показників залізорудної продукції за рахунок створення шихти сумісного сортового складу[8].

Використання традиційних методів планування гірничих робіт при значних зусиллях фахівців технічного, геологічного, маркшейдерського відділів призводить до помилок в керуванні якістю руди та до втрат у гірничозбагачувальному виробництві. Існуючі методи та прийоми планування гірничих робіт потребують удосконалення в плані теорії оптимізації розвитку гірничих робіт кар'єру.

Таким чином, дослідження з прогнозування та оптимізації гірничих робіт в глибоких кар'єрів з врахуванням технологічних властивостей руди є актуальною науково-виробничою задачею, її розв'язання дозволить підвищити контурентноспроможність чорної металургії України.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ І ПЛАНУВАННЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ НА КАР'ЄРАХ

#### 1.1. Динаміка гірничих робіт залізорудних кар'єрах

Техніко-економічні показники залізорудного кар'єру залежать від великої кількості факторів: геологічних, технологічних, технічних, кліматичних. Прояв факторів, їх взаємодію та ступінь впливу на гірничі роботи складно спрогнозувати. Геологічний ризик, ризик не підтвердження запасів є найнебезпечнішим чинником, який може завдати кар'єру значних збитків. Купірувати дію цього фактора вкрай складно. Детальна та експлуатаційна розвідка дають кар'єру вихідну інформацію для розробки необхідних заходів. Негативний ефект може виявитися як у зменшенні запасів руди, так і в погіршенні її якості. Відомо, що геологічна розвідка не дає точної відповіді на питання про реальну кількість та якість руди. Запаси категорії В характеризуються помилкою  $\pm 25\%$ , категорії  $C_1$  –  $\pm 45\%$ . Достовірну інформацію про родовище ми отримуємо тільки після завершення розробки, до цього моменту завжди є невідомість геологічної інформації, ще немає технічної можливості випробувати кожен елементарний блок гірської маси. В процесі розробки планів гірничих робіт, в процесі розробки планів з урахуванням шихтування руди теж виникають похибки підрахунку запасів через усереднення продуктивності гірничотранспортного обладнання

Особливості роботи гірничотранспортного обладнання в забоях не дозволяють забезпечити планові показники елементарних вантажопотоків через існуючу об'єктивну неритмічність роботи виймально-навантажувального та транспортного обладнання. З забоїв буде надходити потік руди якісні показники якого будуть відрізнятися від цільових показників шихти. Таким чином, у усе-



редненому потоці виникають коливання якісних показників руди, середнє значення яких має дорівнювати плановому показнику.

На всіх етапах планування та виробництва гірничих робіт необхідно вивчати характеристики коливання якості в рудних потоках, приймати рішення щодо стабілізації показників рудопотоку. Багато науково-дослідних робіт присвячені вивченню динаміки коливання якісних показників рудопотоків на різних горизонтах планування. У роботі [4] виконано порівняльний аналіз динаміки показників роботи гірничо-збагачувальних комбінатів від перспективного до оперативного рівнів планування. На рис. 1.1-1.2 наведено динаміку щомісячного коливання обсягу та якості руди за місяцями на АМКР.

Аналіз вихідних даних показує, що навіть при значних коливаннях обсягів видобутку руди, місячні коливання якості руди (вміст магнітного заліза) відносно невеликі. Це свідчить про статистичну стійкість середніх показників якості руди на рівні квартално-місячного та річного планування. У той же час мінливість якісних показників руди протягом доби дуже суттєва (рис. 1.3). Рис.1.3 демонструє усереднення якості відносно невеликих, добових обсягів руди. В даному випадку ми спостерігаємо суттєве коливання якості руди. Не можна ці коливання якості пояснити лише геологічними особливостями родовища. Таке випадкове коливання якості руди, безперечно, є наслідком спільного впливу технологічних, організаційних та геологічних факторів.

Змішування в шихті руд різних мінеролого-технологічних сортів виявляє істотний вплив на показники збагачування. В рудопотоках кар'єрів можна бачити часто випадки зн відхилень показників якості руди, значення яких вище припустимих меж впродовж доби. За наявними у авторів даних, відхилення більше 15% мають місце в 4-12% всіх спостережень, що аналізуються, більше 10% - 18-32% випадків, більше 5% - 28-64% діб. Тобто, незважаючи на значні зусилля науковців і виробничників по стабілізації якості рудопотоків, за разни-

ми обставинами мають місце періоди невідповідності фактичних значень плановим. Це свідчить про необхідність підвищення надійності планування[4].

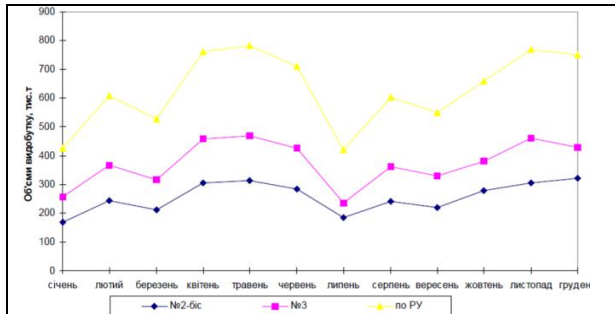


Рис. 1.1. Динаміка видобутку руди кар'єрами АМКР по місяцям

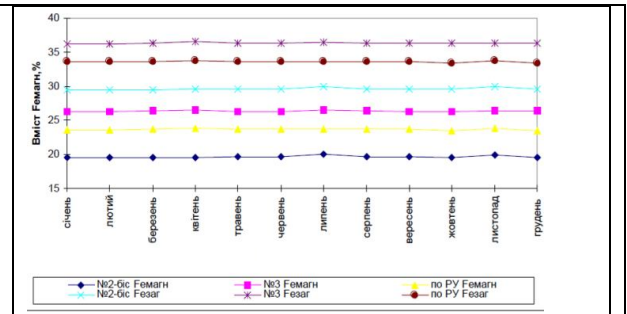


Рис. 1.2. Динаміка вмісту магнітного заліза по місяцям

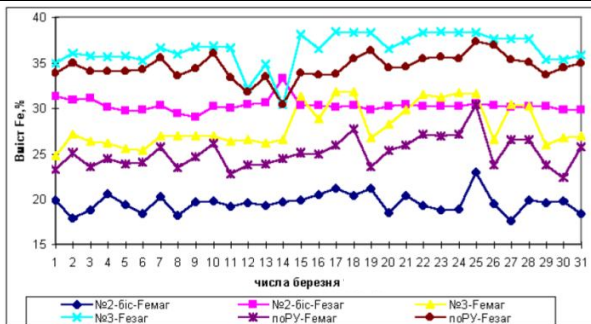


Рис. 1.3. Динаміка видобутку руди кар'єрами АМКР по березню

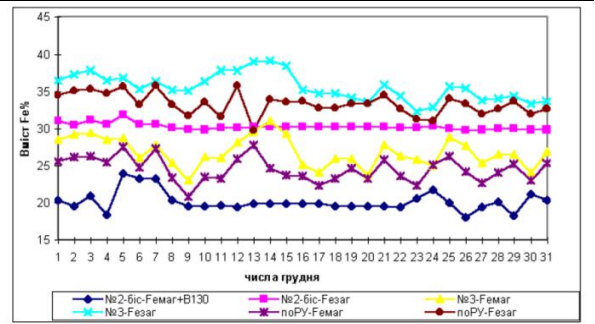


Рис. 1.4. Динаміка видобутку руди кар'єрами АМКР по грудню

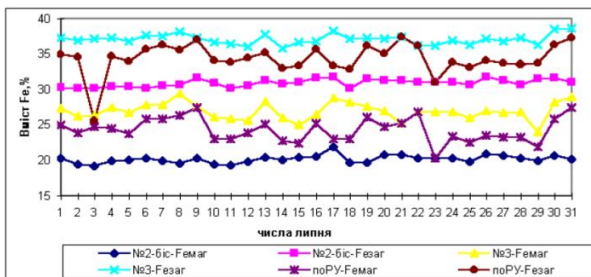


Рис.1.6. щодобова динаміка вмісту заліза магнітного по НКГЗК

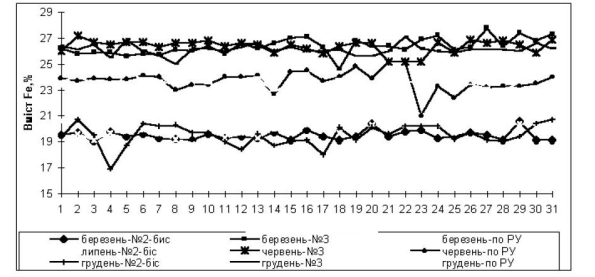


Рис.1.6. Динаміка вмісту заліза по дробильній фабриці НКГЗК

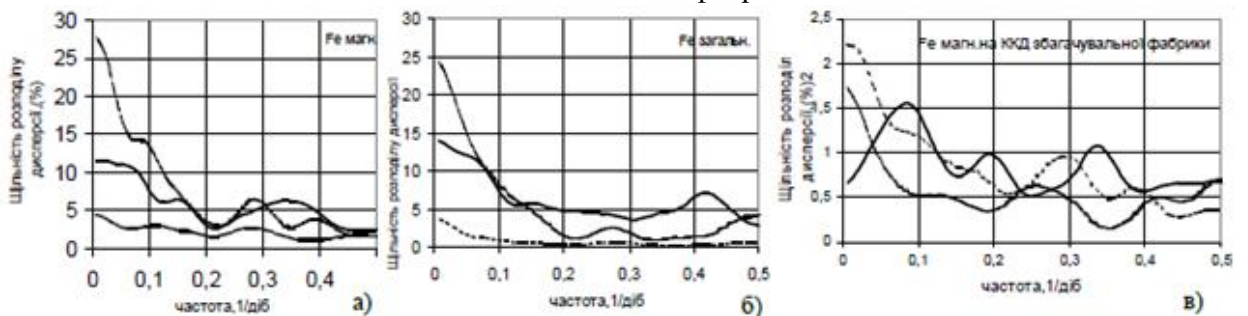


Рис. 1.7 Спектральні щільності розподілу дисперсій (кар'єр№2бис,№3,Рудник) [К]: а) вмісту магнітного заліза; б) загального залізу кар'єрних рудопотоків; в) магнітного заліза на збагачувальній фабриці.

У складі гірничо-збагачувального комбінату може бути кілька кар'єрів і кілька фабрик. В цьому випадку, на фабрики подається рудопотік, який складається з часткових потоків руди окремих кар'єрів. Змішування часткових рудопотоків дозволяє отримати додатковий усереднювальний ефект. На Рис.1.4 можна бачити підтвердження даного твердження. На графіках можна побачити, що і максимальні відхилення, і їх середня величина на 5-10% менше в приймальних бункерах дробильної фабрики від двох кар'єрів ніж по окремим потокам. Однак ми бачимо достатньо високою кількістю виходів якості руди за припустимі межі: для 15% діапазону - 3-8% діб, 10% - 4-16%, 5% - 12-35% усіх діб.

На графіках ми бачимо високу частку відхилень фактичних значень від планових як по добам місяця, так і по годинах доби. Значні коливання якості руди по годинах на збагачувальній фабриці свідчать про те, що по всьому ланцюжку усереднення як у кар'єрі, так і в бункерах подрібнювальної фабрики не можливо одержати ідеальне усереднення. Як наслідок управління якістю руд потрібно удосконалювати. Є два шляхи для цього - вивчення і врахування сортового складу руд, що усереднюються, та впровадження більш досконалих диспетчерських систем керування технологічними процесами на кар'єрах. Перший напрямок дозволить зменшити неоднорідність і невизначеність геолого-технологічних різновидів руд при керуванні видобувною якістю, другий забезпечить підвищення ритмічності роботи кар'єрного обладнання[14].

Наведений вище аналіз показав амплітудні характеристики коливальних процесів показників кар'єрних рудопотоків. Потрібно додатково встановити частотні показники коливань рудопотоків для визначення рівнів керування кар'єром, формуючи контроль показників рудопотоків для зменшення коливань.

На рис.1.7,а,б,в бачимо спектральний аналіз коливань вмісту заліза загального та заліза магнітного по рудопотоках для кожної доби з окремих

кар'єрів, комбінату в цілому і на збагачувальній фабриці АМКР.

Дані спектрального аналізу свідчать про нерівномірний характер розподілу коливань по частотам. В межах спектра частот кар'єрних рудопотоків (рис.1.7, а, б) найвищий рівень коливань заліза магнітного відповідає низькочастотному діапазону з періодом 40-50 діб. В подальшому спостерігається поступове зменшення рівня коливань при частотних діапазонах у періоді в 5 діб. На високочастотному діапазоні простежуються піки на періодах 4 та 2 доби. Для вмісту заліза загального спектр дещо різниться, але тенденція у вигляді гіперболічних залежностей збігається.

В спектрах частот коливань вмісту магнітного заліза на збагачувальній фабриці (рис.1.7,в) явно простежується наявність піків зі значною амплітудою коливань в усіх діапазонах, при цьому найвищий рівень коливань відповідає періоду 40-50 діб і спостерігається на низькочастотному діапазоні на кар'єрах №2біс та №3. В середньочастотному діапазоні спостерігається майже лінійний спад коливань в періодах від 40 діб до 6. У високочастотному діапазоні розмах коливань є локальні максимуми, але загалом рівень коливань менший ніж в інших, та відповідає періодам 2-3 доби.

Виходячи з графіків, амплітуда дисперсії коливань вище у кар'єрних рудопотоках. Це значить, що в бункерах подрібнювальної та збагачувальної фабрик можна досягти приблизно в десять раз менших коливань вмісту корисного компоненту, ніж у вихідній руді. Але усереднювальні властивості збагачувальної фабрики не ідеальні, тому спостерігається досить висока частка відхилень фактичних значень від завданих. Підсумовуючи вищевказане виникає необхідність зосередитись на діях по підвищенню однорідності кар'єрних рудопотоків. Для початку необхідно скорегувати вимоги до організації підготовки виробництва у періодах квартал та тиждень. На більшості кар'єрів планування гірничих робіт з прив'язкою до конкретних блоків виконується на річному, місячному та

добовому рівнях. На інших рівнях планування здійснюється лише розподіл по контрольним цифрам. Отримані ж дані спектрального аналізу показують, що і на тижневому і на кварталному рівнях, також потрібно враховувати якісні зміни руди в блоках для зменшення коливань якості рудо потоків. [4].

Аналіз динаміки рудопотоків в системі гірничо-збагачувального комбінату дає необхідний матеріал для досліджень і розробки шляхів вдосконалення систем керування режимом гірничих робіт.

На вищевказаних рівнях рішення, які виробляються, залежать від двох груп чинників - від кількісно-якісного прогнозу запасів руди в надрах та від надійності методів прогнозування положення гірничих робіт та його розвиток по інтервалах планового періоду. Для цього потрібно виявити та проаналізувати той рівень похибок, який враховується існуючими методами прогнозування стану запасів в надрах. Для виконання цих задач потрібно розглянути співставлення даних детальної та експлуатаційної розвідок по родовищам Криворізької групи. За час видобутку залізистих кварцитів по родовищам в різний час виконувались ці роботи. Загалом аналізуючи ці дані можна зробити висновок про періодичні істотні розбіжності між даними детальної розвідки та експлуатаційної. Особливо розбіжність характерна для родовищ підземного видобутку за рахунок їх генезису, та родовищ складної будови(Першотравневе) які дають істотні розбіжності. Суди ж входять відхилення даних фактичного видобутку від даних прогнозу. Так, по окремих горизонтах родовищ розроблюваних кар'єром максимальне відхилення розміру запасів між даними розвідки досягає  $\pm 20\%$ , зменшуючись до  $\pm 11\%$  в цілому по родовищу. Приблизно така ж якісних показників в руді. Максимальні відхилення між даними детальної та експлуатаційної розвідок досягають  $\pm 22\%$  по окремих горизонтах, зменшуючись до  $\pm 11\%$  в цілому по родовищу [4]. Характерною рисою є низький рівень взаємозв'язку фактичних даних з даними однієї з розвідок. Експлуатаційна розвідка,

яка базується на більш густій сітці свердловин ніж детальна, дає не завжди співпадаючі дані з фактичним видобутком. В той же час, на деяких горизонтах детальна розвідка дає більш близькі дані до фактичного видобутку.

Складність будови родовищ, нерівномірність розміщення рудних тіл по глибині родовища, змінний характер якісних показників з глибиною потребують використовувати при розрахунках всю наявну геологічну інформацію і більш точні методи оперативного підрахунку запасів руди в цілому, а також виділення технологічних сортів руд на родовищах де це не було зроблено, та уточнення даних по родовищам де це було виконано.

Отже, висока вірогідність не підтвердження якісних та кількісних показників руди не дозволяють вважати до кінця розв'язаною проблему керування якістю кар'єрних рудопотоків при встановленні параметрів гірничих робіт на перспективних, поточних та оперативних інтервалах. Для вирішення цих проблем потрібен аналіз проблем існуючих методів планування та постійне підвищення ефективності систем геологічного забезпечення гірничого виробництва.

## **1.2. Досвід використання гірничо-геологічних систем для проектування і планування гірничих робіт на залізородних кар'єрах**

Останні 40 років характеризуються значним прогресом у розвитку автоматизованих систем для цифрового моделювання родовищ та для проектування і планування гірничих робіт в кар'єрах. Науково-дослідні роботи з розробки та вдосконалення комп'ютерних методів проектування та планування гірничих робіт ведуться безперервно, накопичено значний досвід цифрового моделювання родовищ корисних копалин, розроблено методи економічно оптимізації контурів кар'єру та режиму гірничих робіт, автоматизовані найкращі практики проектування та планування гірничих робіт. Але в останнє десятиріччя спостерігається негативна тенденція до зменшення ефективності від впровадження та використання комп'ютерних технологій при плануванні гірничих та геологічних робіт.

Тим не менш, необхідно переходити на нові методи планування гірничих робіт, використовуючи найкращі світові практики. Потрібно шукати нові сучасних імітаційні моделі для гірництва, оскільки постійно з'являються нові інструмент досліджень і аналізу. Відставання в новітніх методах планування української промисловості досить суттєві, тому науковий ривок в цьому напрямку потребує нових досліджень, розробки сучасних програмно-технічних засобів для гірничих робіт, проектування і планування їх розвитку на кар'єрах. Для визначення шляхів розвитку і напрямків вдосконалення потрібно провести аналіз стану закордонних досягнень в галузі комп'ютерних технологій для гірництва[4].

Суттєвий вклад у розвиток гірничої комп'ютерної науки вніс Криворізький гірничорудний інститут. Відомі дві школи цього вузу під керівництвом Ю.П.Астаф'єва та А.С. Давидковича [1,5] і В.Ф. Бизова В.Ф. [2,6,8-11,13-15,18]. Їх розробки та праці співробітників цих шкіл Бєвза Н.Д., Завсєгдашнього В.А.[2,3]. Горлова М.І., Зеленського О.С., Кузьміна Л.П., Коробка В.М. [4,14,15], Поліщука Г.К., Чернова А.П. [12]. та інших, стосуються моделювання родовищ корисних копалин, автоматизації проектування кар'єрів, перспективного, поточного та оперативного планування видобувних робіт та планування і проектування буро-вибухових робіт, розв'язання спеціальних задач відкритої розробки. Ці школи вели розробки комп'ютерних систем для гірництва на підприємствах Кривбасу, басейну КМА, підприємства «Ерденет». Був створено ряд дослідних та промислових зразків програмного забезпечення. Ряд підсистем було впроваджено у гірничє виробництво. Ефективне використання програмного забезпечення було ускладнено через розмежованість інформаційно-обчислювальних центрів комбінатів та технічних відділів в геолого-маркшейдерських служб кар'єрів. Особливо ці проблеми стосуються задач оперативного планування гірничо-збагачувальним виробництвом.

Теоретичні розробки, що були виконані переліченими школами, відповідали світовому рівню, але базувались на застарілій обчислювальній техніці. Систему геолого-маркшейдерського забезпечення для персональних комп'ютерів створено співробітниками Криворізького економічного університету Зеленським О.С., Чуріним М.О. для умов комбінату «Ерденет».

Економічний кризис та спад економіки держав ех-СРСР, створив умови для скорочення кількості робіт з розробки вітчизняних систем проектування та планування гірничих робіт. З початку 2000-х років на гірничих підприємствах на території ех-СРСР почали застосовувати гірничо-геологічні системи закордонного виробництва (DATAMINE, TECHBASE, GEMS, SURPAC,



MICROMINE, VULCAN та ін.).

Система DATAMINE розроблена в 1968 році компанією DataMine International. Складається система з засобів ведення баз даних, інтерактивної графіки, підсистем проектування кар'єрів, проектуванні доріг, планування, проектування підземних робіт, засобів візуалізації..

Система MICROMINE від MicroMine Pty Ltd з Австралії поширена по всьому світу і експлуатується приблизно на декількох сотнях гірничих підприємств. Система має високу якість програмної реалізації гірничо-технічних задач. Вона складається з модулів цифрової моделі поверхні, геології, проектування рудника, моделювання рудного тіла, маркшейдерії.

Програма MINESCAPE складається з модулів геологічної бази даних, геофізичної бази даних, геостатистики, стратиграфічної моделі, блочної моделі, проектування кар'єру, проектування шахти, маркшейдерських розрахунків, проектування дорог, рекультивації земель, буріння і вибухових робіт, контролю якості продукції, планування.

Система VULCAN фірми Martec (Австралія) є пакетом програм з модульною організацією, який може використовуватись як для відкритих, так і підземних робіт. Відрізняється розвиненою трьохвимірною графікою. Включає широке коло гірничих та геологічних задач. Призначений для використання на потужних графічних станціях фірм Silicon Graphics Inc.

Система TECHBASE фірми MineSoft (США) - також один з поширених пакетів. Він придбаний інститутом «Гипроцветмет», підприємством «Ерденет». Дозволяє зберігати графічні дані у власній СУБД оригінальної архітектури, виконувати інтерполяцію на основі геостатистики і моделювати родовища, виконувати розрахунки стійкості відкосів, проектувати кар'єр, планувати гірничі роботи, моделювати рух підземних вод.

В результаті аналізу існуючих засобів комп'ютерного проектування і пла-

нування гірничих робіт можна зробити такі висновки. Майже всі інтегровані пакети та системи мають досить сталий функціональний склад, до якого входять засоби ведення первинної інформації, програмна реалізація методів геостатистики для вивчення і прогнозу геологічних показників, засоби побудови блокових моделей родовища, програмне забезпечення підрахунку запасів, проектування кар'єрів, планування гірничих робіт, осушення кар'єру.

Ведення систем потребує висококваліфікованих спеціалістів з широким колом знань суміжних галузей і математики. Вони повинні проходити довгий курс навчання і оволодіти основами комп'ютерної графіки, геостатистики, математичного моделювання. [28].

### ***Використання GEOVIA Surpac і Minesched для плануванні видобувних робіт з урахуванням вимог до якості концентрату***

Існуюче гірничо-геологічне програмне забезпечення добре автоматизувало ручні методи планування гірничих робіт, але в теперішній час його можливості вже не відповідають новим вимогам гірничого виробництва. Виробники програмного забезпечення шукають и впроваджують нові методи планування і керування гірничим виробництвом.

Основою нових методів теж є блочні моделі, але в багатьох випадках використовують блоки малого розміру.

Особливістю нового алгоритму є функціонал, що дозволяє створити сценарій роботи кар'єру для заданого інтервалу часу. За допомогою цих функцій можливо проаналізувати велику сукупність варіантів календарних планів розвитку кар'єру та обрати найбільш оптимальний. Сучасні програми-планувальники надають можливість планування з урахуванням шихтування руди на тривалий період.

ПЗ Geovia Surpac і MineSched впроваджено на кар'єрі Єристівського ГЗК. Це дозволило перейти до багатоваріантного планування гірничих робіт.

Послідовність дій при моделюванні за допомогою MineSched:

- 1) в Surpac створити плани гірничі роботи на початок та кінець періоду моделювання (рис. 1,8);
- 2) підготувати блочної моделі ділянки родовища в межах якої буде відбуватися моделювання гірничих робіт;
- 3) за допомогою MineSched створюється сценарій розвитку гірничих робіт;
- 4) виконується моделювання розвитку гірничих робіт, підготовка звіту.

Перед моделюванням потрібно визначити для MineSched зони виробництва гірничих робіт. За допомогою стрінгів вказують на нижню брівку фактичного положення на початок місяця та на верхню брівку уступу у проектному положенні. На рис. 1.8 приведено контур кар'єру та стрінги, які оконтурюють гірничі породи різного типу (синій стрінг – скельний розкриття, жовтий – глинисто-піщані породи, червоний стрінг – руда). Для опису гірничо-геологічної ситуації в кар'єрі використовуються стрінги різного призначення. За допомогою стрінгів також оконтурюють також розвали гірничої маси.

Таким чином, для створення сценарію розвитку кар'єру потрібно підготувати наступні вихідні дані: – блочна модель ділянки родовища; – план кар'єру на кінець і початок місяця; – стрінги (контури), запланованих ділянок відпрацювання; таблиця з числовими об'ємами гірничої маси за типом і місцем виймання.

Наступний етап – підготовка блоку технологічних даних та обмежень. необхідно визначити для кожної ділянки вид гірничотранспортного обладнання, плановий об'єм гірничої маси.

Головною метою моделювання є визначення можливого обсягу гірничих робіт, що відповідають продуктивності обладнання, цільовій продуктивності та накладеним на план гірничих робіт обмеженням. При моделюванні також

можуть бути враховані додаткові вимоги до якості руди, наприклад, якість концентрату з руди. За рахунок багаторазового розглядання альтернативних варіантів, що отримуються при зміні тих чи інших обмежень, знаходять варіант плану, що відповідає поставленій меті. MineSched є інструментом, що надає можливість детального аналізу місячного плану гірничих робіт (рис. 1.9), дозволяє дослідити залежність якості показників руди в видобутку (шихти) від навантаження на екскаваторні вибої. Результати послідовно наближення до кращого варіанту місячного плану наведено на рис. 1.12 і 1.13. Метою моделювання був план, що забезпечує цільову якість концентрату (FeC). Варіанти плану, що було набрано в ручному режимі (№9, №10 для FeM та шихтування №9, №10, №11 для FeC) мають гірші показники ніж варіанта запропонований MineSched.

Проте досвід використання MineSched, аналіз її базових принципів функціонування [24] показує, що це програма є інструментом для короткострокового моделювання. Вирішення завдань довгострокового планування з виділенням етапів у розробці кар'єру в даній програмі не реалізовано на необхідному рівні. Можна сказати, що на довгостроковому горизонті планування ця програма більше відповідає завданням відпрацювання горизонтальних пластових родовищ.



Рис. 1.8. Контури для відпрацювання місячного плану гірничих робіт в кар'єрі

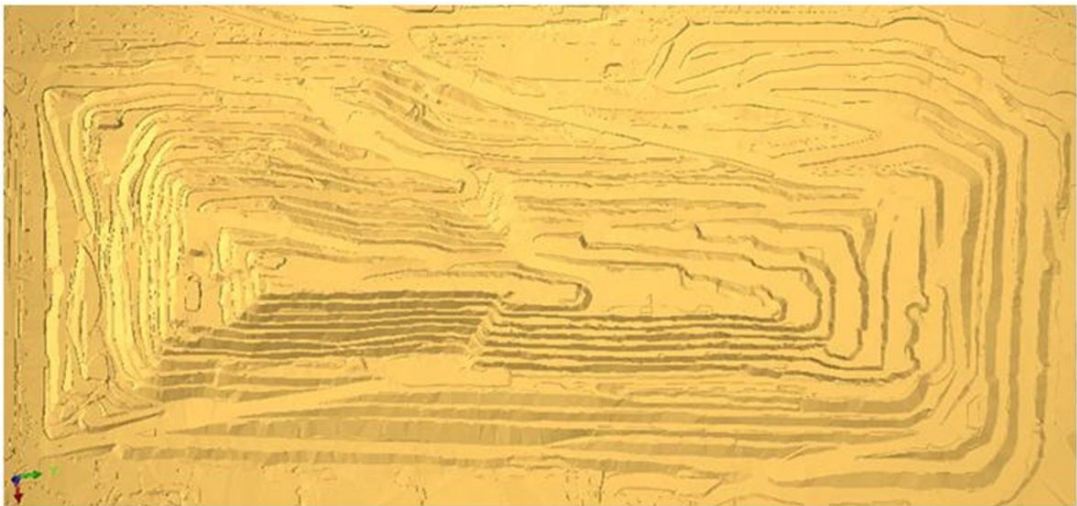


Рис. 1.9. Цифрова модель кар'єру

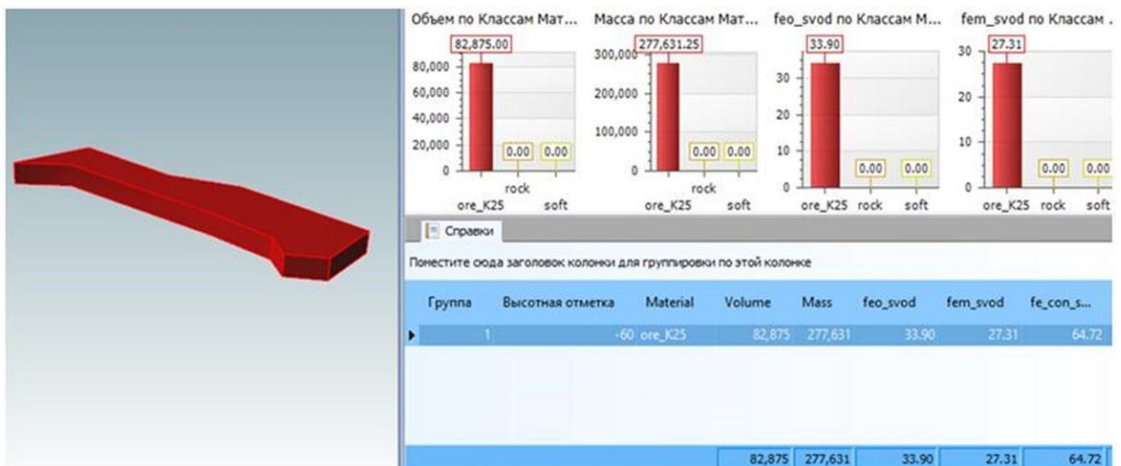


Рис. 1.10. Аналіз ділянки кар'єру після створення технологічних обмежень

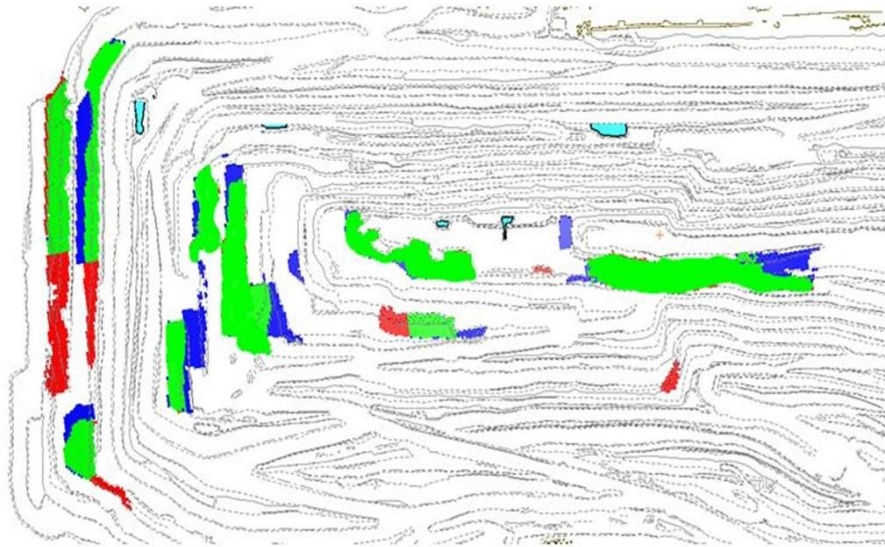


Рис. 1.11. Аналізу місячного плану гірничих робіт [ ]



Рис. 1.12. Графік залежності FeM в руді від кількості шихтувань



Рис. 1.13. Графік залежності FeC з руди від кількості шихтувань  
*Планувальник Micromine Beyond Scheduler*

Основною частиною плану виробництва на кар'єрах є план з видобутку корисної копалини (виробнича програма кар'єру), що визначає подальший розвиток гірничих виробок та визначає: об'єми видобутку гірничої маси, ведення бурових і підривних робіт, об'єми виймання і перевезень копалини та порід, обсяги відвальних робіт, створення транспортних комунікацій в кар'єрі.

- забезпечити запланований розмір річного видобутку корисної копалини;
- правильно розподілити видобуток корисної копалини по ділянкам для забезпечення певної якості корисної копалини, що задається планом;
- забезпечити підготовку розкритих і готових до виймання запасів корисної копалини на визначений період у відповідності з нормами які затверджені на комбінаті.

Будь-яке планування пов'язано з встановленням схем і послідовністю розробки родовища. Процес гірничого планування має певну ієрархію зазвичай включає 3 основні стадії, що мають різні періоди деталізації та горизонти планування [19].

1. Планування в процесі концептуального дослідження – Conceptual (Preliminary) study. Концептуальне (або попереднє оціночне) дослідження виконується для підготовки інвестиційної пропозиції або прийняття інвестиційного рішення. На цьому етапі широко використовуються порівняльні методи визначення обсягу робіт та методів оцінки витрат. Капітальні та операційні витрати, як правило, є приблизними оцінками з використанням історичних даних. Метою такого дослідження є виявлення на ранній стадії аспектів, які можуть бути критично важливими для його життєздатності.

2. Планування в процесі техніко-економічного обґрунтування (проекування) – Feasibility study (Design). Стратегічне планування видобутку зазвичай виконується на увесь період експлуатації кар'єру (LOM – Life of Mine) і більш точно

визначає виробничі потужності, технології, виробничі витрати, доходи та рентабельність. Таке планування часто поєднується з проектуванням і може бути ітераційним для оптимізації усіх критичних показників.

3. Планування виробництва у процесі гірничих робіт – Mining Operations. Оперативне (поточне) планування виконується для прийняття щоденних оперативних рішень про напрямки та параметри видобування задля досягнення щоденного виробничого плану та виконання відповідних ключових показників ефективності (Blom & al., 2018).

Загалом, сучасні кар'єри є досить капіталомісткими, а у випадку видобування низькосортних руд послідовність видобутку на кожному етапі набуває особливого значення (Elevli, 1988). Найефективніший план визначається як графік видобутку, який за існуючих економічних умов та технологічних обмежень, забезпечить видобувному підприємству максимальний прибуток.

Геологічна будова залізрудних родовищ України є досить складною. Продуктивні товщі мають різну форму починаючи від синкліналі та закінчуючи моноклінальною та покладами багатих руд у вигляді жил. Вони представлені сьома залізрудними горизонтами саксаганської світи, які відрізняються петрографо-мінералогічним складом руд та вмістом корисного компоненту. Необхідність урахування великої кількості геологічних, гірничотехнічних, технологічних та інших параметрів робить процес планування надзвичайно складним і трудомістким. Особливо це стосується поточного оперативного планування.

Гірничо-геологічна система Micromine використовується для рішення задач геолого-маркшейдерського забезпечення, побудови цифрових моделей родовища та кар'єру, проектування, планування та керування гірничими роботами. (Bariatska, 2022).

Планувальник Micromine Beyond Scheduler використовується для стратегічного і оперативного планування. Система має такі можливості:



- автоматичне та ручне налаштування залежностей для задач планування гірничих робіт;
- оптимізація стратегічних планів з урахуванням обмежень цільових показників (наприклад, продуктивність, вміст корисної копалини, діапазон періодів планування та ін.);
- оперативні плани дозволяють призначати ресурси і календарі задачам для налаштування виробничих потужностей, ефективності, робочого часу, змін і т.д
- інтерактивна діаграма Ганта з підтримкою перегляду, редагування, вибору, групування, сортування і фільтрації задач (рис. 1.14);
- інтерактивна 3D-візуалізація розробки у часі з використанням анімації послідовності задач;
- генератор звітів, що дозволяє налаштовувати і створювати різноманітні виробничі звіти;
- експорт-імпорт каркасів планування та поверхонь відпрацювання для використання іншими модулями Micromine або аналогічними програмними продуктами з відкритим кодом що дозволяє їм взаємодіяти між собою.

Робочий процес календарного планування Micromine (рис. 1.15) оснований на використанні каркасів-солідів. Спочатку використовуються спеціальні інструменти для перетворення вихідного проекту кар'єру з ліній у тривимірні каркаси, що являють собою задачі з видобування. Потім задачі співвідносяться з блоковою моделлю і надалі імпортуються в планувальник Ганта для визначення послідовності і оптимізації плану.

Планувальник Micromine створює плани двох різних типів, стратегічні і оперативні. Стратегічний план надає можливості оптимізації, що використовується для визначення оптимального графіку видобування (рис. 1,16). Оперативний план дозволяє налаштовувати календарі і ресурси (Bartlett, 2021).

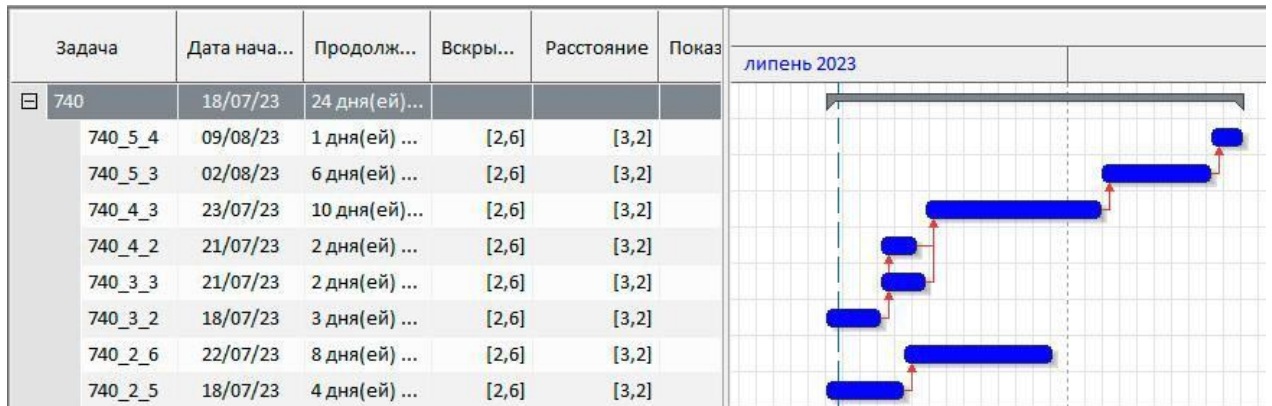


Рис. 1.14. Діаграма Ганта з таблицею атрибутів



Рис. 1.15. Алгоритм процесу планування відкритих гірничих робіт за допомогою Micromine Scheduler

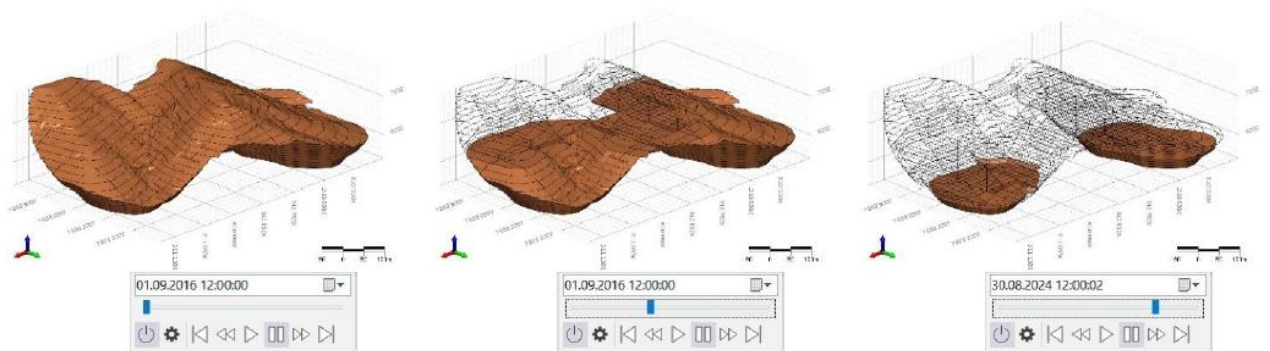


Рис. 1.16. Положення виймальних блоків родовища при стратегічному плануванні

Методологія планування базується на використанні стратегічного плану для складання оптимізованого плану на увесь термін експлуатації кар'єру. В подальшому це можна використовувати як базу для середньострокового (або

короткострокового) планування. Наприклад, частина рішень оптимізованого довгострокового плану може використовуватись середньо-короткостроково. Після виконання оптимізацій оперативний план можна використати для підготовки короткострокового виробничого графіка.

Планування видобутку у кар'єрі як показує практика охоплює підготовку декількох планів, рівень деталізації кожного з яких вище ніж у попереднього.

Для удосконалення планування родовищ залізистих кварцитів Кривбасу, враховуючи геологічне розміщення покладів руд з різними якісними показниками сучасне ПЗ повинно:

- бути адаптоване під автоматичне, напівавтоматичне, ручне налаштування задач;
- вміщувати стратегічні плани з оптимізацією цільових показників (продуктивність, якість корисної копалини та її вміст і час);
- мати інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що не потребує значного часу на навчання тим самим полегшує впровадження його на комбінаті, та для виконання основних задач як от вносити зміни в оперативні плани, процеси ведення гірничих робіт з призначенням ресурсів, календарів та ін.;
- інтерактивний графічний покажчик всіх операцій і їх послідовності з можливістю перегляду, редагування, вибору, групування, сортування і фільтрації задач по процесам гірничих робіт (у якості прикладу – діаграма Ганта);
- інтерактивну візуалізацію розробки (використання 3D, VR технологій);
- формування електронних звітів, що дозволяє обирати найбільш доцільний варіант розробки родовища.

Застосування сучасного ПЗ для планування гірничих робіт залізородних кар'єрів України за рахунок цифровізації виробничих процесів і порівняння різних варіантів розвитку гірничих робіт здатне підвищити швидкість та ефективність планування і прийняття оперативних рішень[14].

### 1.3. Висновки за розділом 1

Не зважаючи на досягнутий рівень техніки та технологій гірничих робіт та збагачення залізних руд, в роботі залізородних кар'єрів є суттєві неузгодженості між планом та фактичними результатами збагачення руд. В залежності від ступеня геологічної вивченості ділянки надр, від рівня планування та керування гірничим виробництвом відхилень фактичних и планових показників може досягати  $\pm 5...25\%$ .

Спектральний аналіз забойних рудопотоків свідчить про проблеми з керованістю рудопідготовкою на оперативному та короткостроковому рівнях планування (місячно-тижневому, квартальному та річному планування). Відхилення від рекомендованого теорією рівня геологічної вивченості родовища (частка категорії В для надійного проектування кар'єрів не менше 20%, рекомендований геологічною теорією рівень – 40%), недосконалість методів планування короткостроковим розвитком гірничих робіт призводить до розбіжностей до  $\pm 35\%$  між підрахунками запасів по даним детальної і експлуатаційної розвідок та фактичному видобутку по окремим горизонтам, та до 5-20% в цілому по родовищу. Це свідчить про необхідність відновлення на кар'єрах робіт з геологорозвідки на довгостроковому та короткостроковому горизонтах, про необхідність розширення номенклатури технологічних властивостей руди, що вивчаються (якість концентрату; шкідливі домішки/мінерали, які впливають на ефективність процесу збагачення). Отримати ефект від запропонованих заходів можливо при вдосконаленні методології короткострокового планування за рахунок використання блокових моделей родовища, моделей робочої зони кар'єру та методів оптимізації планів розвитку гірничих робіт.

В Україні на даний час відсутні вітчизняні гірничо-геологічні системи, які призначені для оптимізації короткострокового планування з урахуванням геологічних та технологічних обмежень. Також відомо не багато прикладів викорис-

тання для оптимізації оперативних планів гірничих робіт закордонного програмного забезпечення. Довільним є впровадження сучасних світових практик керування якістю продукції залізородних кар'єрів.

Більшість відомих методів оптимізації гірничих робіт використовує лінійні моделі. Більшість відомих програм - планувальників є досить недосконалими, непридатні для вирішення реальних бізнес-завдань оперативного управління гірничими роботами. Постановка задачі планування гірничими роботами в основному обмежується задачами, які схожі на задачі розподілу ресурсів, тобто, яку частку руди видобути з блоку. Також більшість програм-планувальників, що використовуються в Україні, не враховують раціональну послідовність розробки родовища в міру поглиблення кар'єру.

Великі сподівання покладаються на розробку нових методів планування та оптимізації, які будуть забезпечувати прямий набір заданих показників гірничих планів. Прямий набір потребує моделювання технологічних параметрів відкритої розробки за допомогою дрібно блочної геолого-технологічної моделі. Робоча зона кар'єру, видобувні та екскаваторні блоки поділяються на дискретні елементарні блоки малого розміру. Подальше збільшення ступеня дискретизації гірничо-геологічних об'єктів при плануванні і проектуванні гірничих робіт реалізується в плануючих підсистемах сучасних гірничо-геологічних програм.

Можливості сучасних програм-планувальників (scheduler) дозволяють використовувати моделі робочої зони кар'єру наближені до фактичного стану положення фронту гірничих робіт. Блочне моделювання родовищ, екскаваторних блоків, заходок виконується з використанням дрібних блоків ( $5 \times 5 \times 5$  м). Об'єм блоку з гранню 5 м ( $5 \times 5 \times 5 = 125 \text{ м}^3$ ) у 27 разів менший, ніж об'єм блоку з гранню 15 м ( $15 \times 15 \times 15 = 3375 \text{ м}^3$ ). Висота блоку 15 м була обумовлена міркуваннями технологічного характеру (кратність висоті уступу). Перехід на дрібніші блоки, які будуть кратними висоті уступу, при вирішенні короткостроко-

вих оптимізаційних завдань не викликає виникнення додаткових обчислювальних проблем.

Важливо для оперативного планування гірничих робіт у глибоких залізорудних кар'єрах використати таку систему-планувальник яка враховує динамічний взаємозв'язок гірничо-геологічних об'єктів у просторі кар'єру і часі. Це особливо стосується гірничо-геометричних взаємозв'язків технології відкритих робіт. Будь-яке рішення по веденню гірничих робіт, прийняте на поточному кроці пошуку варіантів повинно враховувати всі зміни на попередніх кроках, та забезпечувати механізм відтворення цих рішень на наступних кроках.

Існуючі дискретних методів і моделей оптимізації гірничих робіт призначені для розв'язання окремих задач планування і ще не є поширеними. В існуючих доробках недостатньо приділяють уваги технологічним основам оптимізації гірничих робіт в глибоких кар'єрах, що відпрацьовують круто падаючі родовища. Прикладна теорія дискретної оптимізації розвитку гірничих робіт на кар'єрах ще знаходиться в стадії розробки та апробації в умовах гірничого виробництва.

Головною метою магістрантської роботи є аналіз та узагальнення методів оптимізації гірничих робіт з урахуванням поточного стану гірничих робіт, технологічних параметрів кар'єру, геологічної вивченості ділянки надр, що залучається у відпрацювання. Впровадження та опанування методів оптимізації гірничих робіт буде сприяти підвищенню якості і конкурентоспроможності залізорудної рудної сировини гірничо-збагачувальних комбінатів України.

Для досягнення поставленої мети в магістрантській роботі потрібно вирішити наступні задачі досліджень:

- аналіз гірничо-геологічних систем для проектування і планування гірничих робіт на кар'єрах, що використовуються на кар'єрах України;
- обґрунтування технологічних параметрів оптимізації гірничих робіт та

аналіз мінералого-технологічного моделювання родовищ залізистих кварцитів що базується на аналіз ф особливостей розробки на переробки руд;

- аналіз геолого-мінералогічних та технологічних факторів, які впливають на стабільну роботу гірничо-збагачувального комбінату в режимі усереднення якості руди

аналіз геолого-мінералогічних та технологічних факторів, які впливають на стабільну роботу гірничо-збагачувального комбінату в режимі усереднення якості руди;

- дослідження методології дискретної оптимізації і розробка моделей прямого набору заданих показників із множини варіантів, які побудовані з урахуванням технологічних параметрів у конкретній ситуації;

- обґрунтування гірничо-геологічної системи для оперативного планування гірничих робіт в режимі усереднення по якості концентрату.

аналіз геологічних, мінералого-петрографічних та технологічних факторів, які можуть впливати на стабільну роботу гірничо-збагачувального комбінату в режимі усереднення якості руди

## РОЗДІЛ 2

**АНАЛІЗ ГЕОЛОГО-МІНЕРАЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА СТАБІЛЬНУ РОБОТУ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ В РЕЖИМІ УСЕРЕДНЕННЯ ЯКОСТІ РУДИ****2.1 Вплив коливань якісних показників на стабільну роботу комбінату.**

Під час підготовки вихідної інформації для планування гірничих робіт у режимі усереднення виникає проблема аналітичного опису скалярної функції якості руди по родовищу [9]. Сутність проблеми ось у чому. Після проведення дорозвідки, детальної або експлуатаційної розвідок на погоризонтних планах виносяться по координатам устя свердловин з якісними показниками основних корисних компонентів (рис. 2.1). На геологічних розрізах виносяться проекції траси цих свердловин з опробування по визначених інтервалах. По цих результатах за допомогою методів інтерполяції, апроксимації, можна знайти аналітичне наближення функції розміщення якості руди в надрах. Кожен із перерахованих методів має певні переваги та недоліки. Так, інтерполяційні методи при наявності ураганних проб та незначній кількості проб можуть давати великі сплески, що призводять до значних похибок. На високому рівні розроблено методи апроксимації даних спостережень. Однак ці методи дають позитивні результати лише в тому випадку, коли заздалегідь відомий аналітичний вираз апроксимуючої функції. Останнім часом досить широко розвиваються методи наближення функцій за допомогою сплайнів. Таке наближення практично повністю ліквідує недоліки інтерполяції та апроксимації.

У загальному випадку функція розміщення якості руди  $L$  повинна забезпечити мінімальне значення функціоналу [9]:

$$F = \int_{\Omega} [L(x, y, z) - \alpha(x, y, z)] dV \rightarrow \min$$



де  $L(x, y, z)$  - наближення функції розміщення якості;

$\alpha(x, y, z)$  - функція розміщення якості руди.

Алгоритм наближення функції розміщення якості необхідний для визначення якості руди при оцінці і зіставленні альтернативних варіантів планів гірничих робіт під час планування в режимі усереднення.

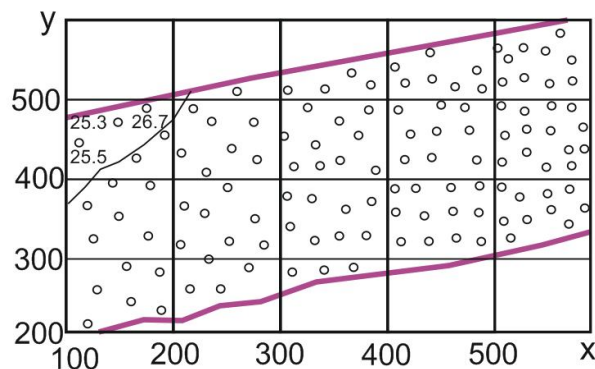


Рис. 2.1 Сітка опробування свердловин на горизонті

Для надійного планування гірничих робіт та процесу переробки залізних руд на фабриці, особливо при виробництві високоякісного концентрату (вміст заліза в концентраті  $67^{+}\%$ ) необхідна інформація про коливання якості, тобто про їх частоту та середньоквадратичне відхилення. Середньоквадратичне відхилення залежить від просторового розміщення якісних показників руди в надрах та її неоднорідності.

У більшості науково-дослідних робіт із усереднення якості руд основна увага приділяється амплітудно-частотним характеристикам коливань якості. У меншій кількості робіт розглядається фазочастотний склад коливань якості руди.

Перспективність використання фазо-частотних перетворень коливань якості руди можна проілюструвати на наступному прикладі [8]. Розглянемо випадок, коли видобуток руди проводиться двома екскаваторами. Припустимо, що у кожному вибої генерується однакова функція якості  $K=K(t)$ . Такий випадок мо-

же бути, якщо обидва екскаватори синхронно відробляють рудний поклад вхрест простягання. Екскаватори одночасно відпрацьовують поклад від одного геологічного контакту до іншого (наприклад, відпрацювання від контакту лежачого боку до контакту висячого). При цьому середньозважена якість руди в об'єднаному рудопотоці буде такою самою, як і в елементарних рудопотоках з екскаваторних вибоїв. Але якщо змінити розміщення екскаваторів – один відпрацьовує центральну частину покладу, а другий працює від контакту з рудою (це рівносильно зсуву фаз), то коливання якості руди в об'єднаному потоці зменшуватиметься. Ймовірно, можуть бути варіанти, коли коливання будуть зведені нанівець.

Наведений приклад показує доцільність використання при управлінні усереднення руд фазово-частотних перетворень якості руд. Не дивлячись на важливість вивчення фазо-частотного складу коливань якості досі не розроблена методика визначення фазо-частотних характеристик за дослідними даними, відсутні теоретичні дослідження щодо встановлення їх взаємозв'язку з коливальним процесом. Вирішення цієї проблеми дозволить не тільки правильно планувати відпрацювання видобувних блоків, а й контролювати процес коливань якості руди після шихтування в усереднених комплексах за відомими перетвореннями Фур'є. Фазо-частотні характеристики дозволяють вирішувати питання не тільки щодо раціональних параметрів усереднювальних складів і бункерів, але і щодо найбільш вигідного (з точки зору коливань якості) порядку відсипання штабелів та їх відвантаження.

Багаторічні глибокі дослідження були присвячені проблемі оцінки впливу коливань якості руди на показники збагачення, пошуку прямої ув'язки показників збагачення з показниками якості заліза магнітного, огрудкування, доменного переділу, тощо. Було встановлено залежність різних технологічних показників як то продуктивність збагачувальних фабрик, виходу концентрату, втрат за-

ліза у хвостах від коливань якості руди. Нажаль ці дослідження переважно є емпіричними. Тому результати наукового аналізу, наведені в різних роботах, мають хоч і несуперечливий характер, проте несуть значні відмінності одна від одної (рис. 2.2). Ці відмінності ускладнюють практичне використання результатів при проектуванні систем усереднення. І незважаючи на те, що у висновку виконані дослідження повинні мати ефективність при усередненні руд часто оцінити те чи інше технічне рішення по усередненню не можна через відсутність визначеності того, що це дасть виробництву. Тому виникає проблема теоретичного обґрунтування щодо оцінки впливу коливань якості руди на основні показники збагачення та їх підтвердження що супроводжувалося б дослідницькими даними роботи збагачувальних фабрик.

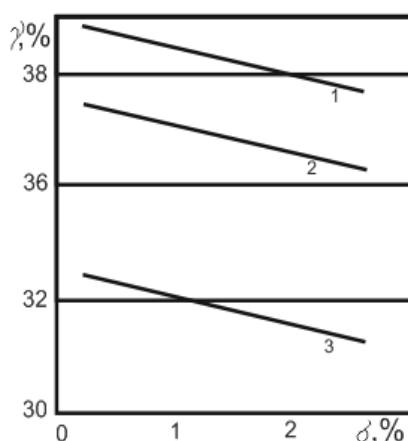


Рис. 2.2 Графік залежності виходу  $\gamma$  концентрату від середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  якості руди: 1 – кар'єри ЦГЗК; 2 – кар'єри НКГЗК; 3 – кар'єри ПівнГЗК [8]

У проблемі оцінки впливу коливань якості руди на роботу збагачувальної фабрики залишилося невирішеним питання про ритмічність виробництва концентрату, яке має першорядне значення. Суть цього питання полягає в наступному. Вихід концентрату  $\gamma$  пов'язаний з якістю руди  $\alpha$ , вмістом корисного компоненту у хвостах  $\nu$  та концентраті  $\beta$  формулою балансу, тобто:

$$\gamma = (\alpha - \nu) / (\beta - \nu) \quad (2.2)$$

При стабільному режимі роботи апаратів збагачувальної фабрики вмісти заліза в хвостах і концентраті є постійними величинами. З огляду на це формулу (2.3) можна виразити у вигляді:

$$\gamma = a_1 \alpha + a_2; \quad a_1 = \frac{1}{\beta - \nu} = \text{const}; \quad a_2 = \frac{\nu}{\beta - \nu} = \text{const} \quad (2.3)$$

Припустимо, що якість руди є випадковим процесом, що характеризується спектральною щільністю  $S_p(\omega)$ . Тоді вихід концентрату буде також випадковим

$$S_K = a_1^2 S_p(\omega) \quad (2.4)$$

Продуктивність збагачувальної фабрики з виробництва концентрату (т/год) визначається за такою формулою:

$$Q_K = \gamma Q_p = Q_p (a_1 \alpha + a_2), \quad (2.5)$$

де  $Q_p$  – погодинна продуктивність збагачувальної фабрики з переробки руди.

З формули (2.6) видно, що при постійній кількості руди, що подається на збагачувальну фабрику, продуктивність її по концентрату є, скоріше, випадковою величиною, яка характеризується спектральною щільністю:

$$S_K = a_1^2 Q_p^2 S_p(\omega) \quad (2.6)$$

Отже, кількість концентрату, виробленим фабрикою, при стабільному режимі носить коливальний характер, пов'язаний з постійною зміною якості руди, що подається на фабрику. У певні моменти, коли якість руди падає нижче планових показників, збагачувальна фабрика не виконує план з виробництва концентрату, що веде до переповнення складу концентратом з низькою якістю, претензій з боку споживачів ЗРС, до зупинки гірничо-збагачувального виробництва.

При перевищенні фабрикою планової якості руди, це можна розглядати, як прояв селективного відпрацювання родовища, що призведе до падіння якості продукції в найближчі періоди. Виникає проблема визначення параметрів проміжних складів, сформованих за якістю концентрату, який можна виробити з руди. Виходячи з річної продуктивності кар'єру по руді, мінералогічних та технологічних властивостей, календарного розподілу обсягів руд з різними технологічними властивостями необхідно обґрунтувати графік формування та відпрацювання складів руди. Таке управління складами руди, які сформовані за критерієм стабільності технологічних властивостей, дозволяє ефективно керувати виробництвом та збутом залізородної сировини.

Зростання вимог споживачів ЗРС до її якості зумовило збільшення якості виробленого концентрату до рівня 69-70%, що перевищує проектні показники. У таких умовах набувають особливої актуальності дорозвідка родовищ з поглибленим вивченням технологічних властивостей руд, проведення робіт з геолого-мінералогічного та технологічного картування руд із виділенням сортів руд за якістю концентрату.

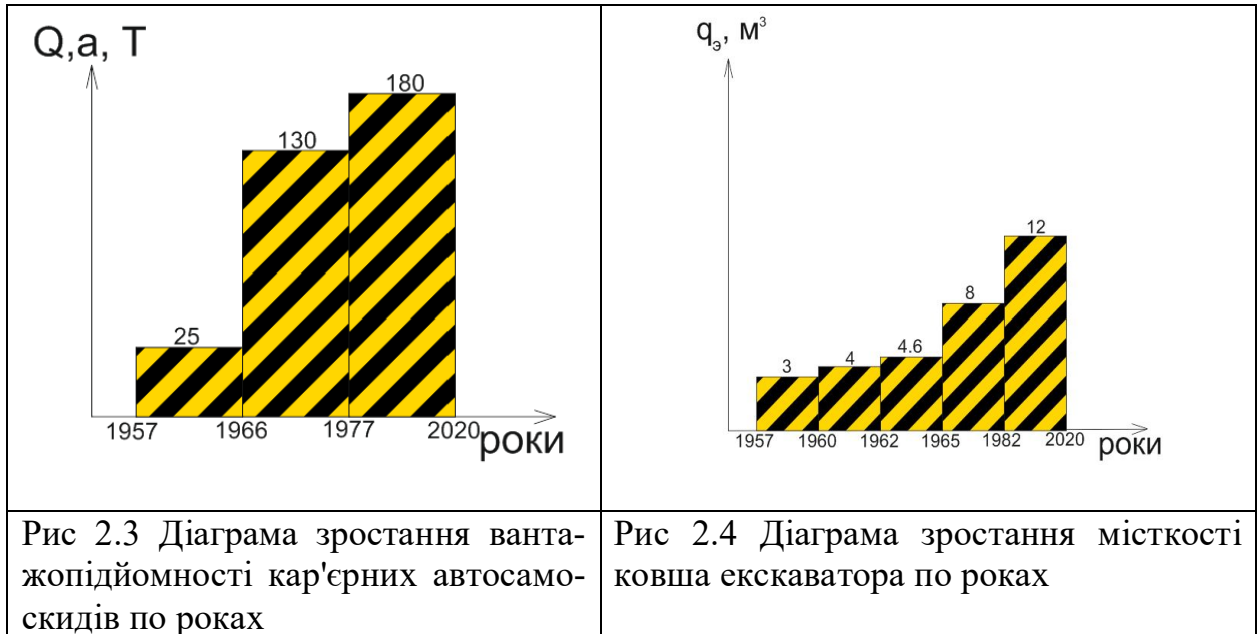
Відомі наукові роботи, в яких досліджується вплив якості агломерату та окатків на металургійне виробництво. Але робіт, присвячених оцінці впливу коливань технологічних властивостей руд на якість концентрату та методології

планування гірничих робіт з урахуванням виробництва високоякісного концентрату відомо небагато.

Від рівня якості окатків залежать техніко-економічні показники металургійного переділу. Наприклад, при збільшенні коливань вмісту заліза в окатках збільшується витрата коксу на виплавку чавуну: при коливаннях вмісту заліза  $\pm 0,5-1\%$  витрата коксу збільшується на  $2\%$ , а при коливаннях заліза  $\pm 2\%$  - на  $4\%$ .

Вищевказане свідчить про необхідність вирішення проблеми оцінки впливу на мінливість якісних показників руди та на коливання якості продуктів збагачувального переділу.

Одним з найголовніших чинників для частоти коливань є продуктивність гірничо-транспортного обладнання. Зазвичай, проекти систем усереднення, складаються на тривалий період або навіть на весь термін відпрацювання кар'єру. За цей час продуктивність гірничого обладнання значно змінюється. Так, за період 1980-2020 років вантажопідйомність автосамоскидів на відкритих гірських роботах змінилася з 70 до 180 т (рис. 2.3), а місткість ковша екскаватора – з 4,6 до 12 м<sup>3</sup> (рис. 2.4). Зі зміною продуктивності гірничого обладнання змінюються частота коливань якості та параметри систем усереднення. У зв'язку з цим виникає необхідність довгострокового прогнозування технічного переоснащення гірничих підприємств та продуктивності гірничого обладнання. У цьому плані заслуговує на детальний розгляд проблема директивного прогнозування, згідно з якою технічна переозброєність планується в часі. Вирішення проблеми директивного, прогнозування дозволить проектним організаціям передбачити в системах усереднення якості руд зміну продуктивності гірничого обладнання та можливість реконструкції систем у різні періоди роботи гірничого підприємства.



Проблематиці перспективного планування гірничих робіт присвячені численні дослідження. Розроблено числені методи, що дозволяють складати перспективні плани гірничих робіт з урахуванням сталості якісної характеристики руд, обсягів розкривних робіт, технічних можливостей гірничого обладнання. До складання перспективних планів та річних програм, як правило, залучаються великі колективи інженерно-технічних працівників, які виконують усі роботи з підготовки необхідної технічної документації, підрахунку обсягів розкривних порід та руди, визначення її якості руди, вибору раціонального розвитку гірничих робіт. Зазвичай ці роботи виконуються вручну, а час, необхідний на їх виконання, обчислюється кількома місяцями. Часто стан робіт напочатку і наприкінці проектування настільки відмінний між собою, що результати розрахунків можна лише частково використовувати на практиці. Назріла гостра необхідність вирішення проблеми автоматизації перспективного планування гірничих робіт у режимі усереднення з використанням сучасного програмного забезпечення. То-

му створення алгоритмів, що забезпечують необхідну оптимізацію робіт по перспективному плануванню є актуальним завданням. Крім того бажано привести законодавчі акти по збільшенню можливостей по роботі з інформаційними системами та зменшенню паперового чинника.

Невирішеним завданням є впровадження на залізрудних гірничо-збагачувальних комбінатах системи диспетчеризації з управлінням кар'єрів у режимі усереднення. На більшості кар'єрів запроваджено систему диспетчеризації роботою гірничотранспортного обладнання. Дані системи використовують системи супутникової навігації для визначення положення в кар'єрі автосамоскидів та комплекс датчиків, що фіксують основні параметри роботи самоскида.

Основною перешкодою у створенні ефективних систем оперативного управління вантажопотоками в режимі усереднення є відсутність достатнього обсягу вихідних даних про технологічні властивості руди в розвалі, відсутність методів оперативного визначення якості концентрату руди, що видобувається. У світовій практиці гірничої справи відомі приклади систем оперативного керування гірничими роботами, які при керуванні роботою кар'єрного автотранспорту використовують спеціалізовані блокові моделі родовища, призначені для короткострокового планування гірничих робіт. На залізрудних кар'єрах України немає прикладів використання таких систем управління.

Таким чином, важливою ланкою у підвищенні рівня керування якістю руди є оперативне керування роботою гірничотранспортного обладнання з використанням цифрових моделей рудних розвалів та впровадження методів автоматичного випробування з необхідною точністю якості руди у вибоях.

Як було зазначено раніше, у стабілізуючі властивості усереднених складів характеризуються амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики. У роботі [8] запропоновано оптимізувати розв'язання задачі за рахунок визначення верхніх меж амплітудно-частотних характеристик усереднених складів. У тако-



му разі, середньоквадратичне відхилення якості в рудопотоці завжди буде менше розрахункового значення. Аналітичне вирішення цього завдання ускладнюється тим, що фазо-частотні характеристики усереднених складів та можливості у перетворенні коливань якості руд переважно ще не вивчені. Для вирішення цієї проблеми необхідний комплекс теоретичних та експериментальних досліджень з вивчення властивостей та параметрів усереднювальних систем.

На залізорудних кар'єрах України широко використовують комбінований транспорт. При використанні комбінованого транспорту його суміжні ланки стикаються за допомогою пунктів перевантаження.

При автомобільно-залізничному транспорті перевантажувальні екскаваторні пункти виконують також функцію усереднення руди.

Кількість та розташування перевантажувальних пунктів мають вплив на техніко-економічні показники кар'єрного транспорту та на ефективність усереднення руди. Особливістю комбінованого транспорту і те, що з розвитку гірських робіт, з віддалення пунктів навантаження від екскаваторних вибоїв зростає відстань транспортування автотранспортом. Тому перевантажувальні пункти необхідно періодично переносити. До перенесення перевантажувального пункту необхідно підготувати майданчик для його розміщення (виконати гірничо-підготовчі роботи, відсипати насип перевантажувального майданчика, виконати реконструкцію транспортної та енергетичної інфраструктури кар'єру).

У той же час перевантажувальні пункти комбінованого транспорту можуть негативно вплинути на динаміку розвитку гірничих робіт, вони обмежують, стримують розвиток гірничих робіт на тій ділянці борту кар'єру, де вони розташовані. Це може призвести до зацілічування руди, тобто вони можуть негативно вплинути на рудну шихту кар'єру.

Таким чином, існує складне науково-виробниче завдання визначення оптимального положення в кар'єрі перевантажувального (усереднювального) пун-

кту. У кар'єрі зазвичай експлуатується кілька перевантажувальних пунктів. Розташування перевантажувальних пунктів впливає на топологію кар'єрних рудопотоків, на можливість досягнення оптимального усереднення руди.

При використанні циклічно-потокової технології також існують складнощі з формуванням оптимального рудопотоку на збагачувальну фабрику.

Існує два основних варіанти транспортної схеми з використанням конвеєрів. Перший варіант – доставка руди з кар'єру безпосередньо на збагачувальну фабрику. Така схема реалізована на кар'єрах ІНГЗК та ПівдГЗК (у минулому така схема була також на Ганнівському кар'єрі). Другий варіант – доставка руди з кар'єру на поверхневий перевантажувальний пункт та далі залізничним транспортом на збагачувальну фабрику (ця схема використовується на кар'єрах ПівнГЗК, АМКР, на Полтавському ГЗК).

При використанні ЦПТ складно сформувати кілька вантажопотоків із різною якістю руд. З погляду управління якістю руди схеми з ЦПТ є дуже жорсткими, які прагнуть повного усереднення руди. Для формування вантажопотоків з різною якістю найпростішим рішенням є використання в кар'єрі накопичувально-усереднювальних складів, але таке рішення ускладнює та здорожує виробництво гірничих робіт.

З 70-х років минулого століття відомі рішення щодо використання в складі систем диспетчеризації датчиків, які забезпечують визначення якості руди в кузові автосамоскида в оперативному режимі. Система диспетчеризації має можливість на підставі якості руди в кузові автосамоскида визначити пункт розвантаження автосамоскида.

## 2.2. Висновки за розділом 2

Зростання вимог споживачів ЗРС до її якості зумовило збільшення якості виробленого концентрату до рівня 69-70%, що значно перевищує проектні показники.

З початком видобутку руд на кар'єрах Кривого Рогу ми бачимо падіння розвіданості запасів в деяких випадках з 70% до нижче 20 %. (мається на увазі спираємість рудних контактів виробки, які перетинають рудні контакти, що знаходяться по сітці 100\*200 по протяжності та 200\*300м по падінню. Це дозволяє з високою точністю спрогнозувати кількісно-якісну характеристику руд що відповідає категорії розвіданості запасів В.

Все частіше кар'єрам доводиться спиратись на дані інтерполяції та користуватись виключно даними експлуатаційної розвідки, пробуреної на 1-2 уступі. Це призводить до все частіших непідтверджень якісних та кількісних показників руди. Все це ускладнюється особливостями просторового розміщення якісних показників руди в надрах та їх неоднорідності.

У таких умовах набувають особливої актуальності дорозвідка родовищ з поглибленим вивченням технологічних властивостей руд, проведення робіт з геолого-мінералогічного та технологічного картування руд із виділенням сортів руд за якістю концентрату.

Крім того підвищенні рівня керування якістю руди дасть оперативне керування роботою гірничотранспортного обладнання з використанням цифрових моделей рудних розвалів та впровадження методів автоматичного випробування з необхідною точністю якості руди у вибоях можливо, рішенням є використання в складі систем диспетчеризації датчиків, які забезпечують визначення якості руди в кузові автосамоскида в оперативному режимі. Можливо слід спиратись на досвід кращих світових практик.

## РОЗДІЛ 3

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАНУВАННЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ ЗА  
РАХУНОК ПОДІЛУ РУД ЗА ЇХ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Практика відкритої розробки родовищ залізистих кварцитів Криво-ріжжя показує, що в зв'язку зі складністю форм родовища, нерівномірним розподілом корисної копалини в просторі, нерівномірністю гірничого обладнання та іншими факторами, спостерігаються коливання якості руди, що негативно впливає на основні показники збагачення і вимагає проведення ряду технічних заходів щодо їх усунення. Для цього потрібно вирішення трьох взаємопов'язаних питань[18]:

дослідження причин виникнення коливань якості руд та оцінка їх величини;

визначення стабілізуючих властивостей існуючих і перспективних усереднених комплексів;

Підбір раціональних систем по усередненню якості і параметрів залізних руд, що відповідають гірничовидобувним вимогам.

Основним завданням при виявленні причин утворення коливань якості руди є визначення відповідно до умов залягання покладу та генезису родовищ Кривбасу, необхідних даних про величину коливань, що утворюються при розробці гірничих блоків. Ці дані є вихідними даними для розрахунку коливань якості об'єднаного потоку, тобто після з'єднання окремих потоків руди від добувних блоків до одного з змішувальних пристроїв. Знання флуктуацій якості залізистих кварцитів в об'єднаному потоці дозволяє оцінити ефективність застосування даної системи усереднення в конкретних умовах.

Якість руди - це сума її експлуатаційно-споживчих властивостей, які характеризують хімічний, мінералогічний склад корисної копалини, її фізико-технічні властивості і текстурно-структурні особливості.

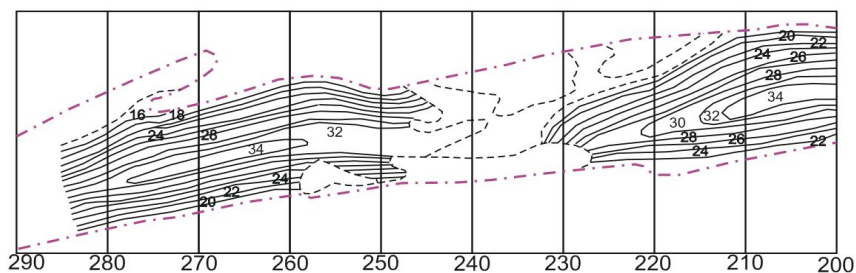
Споживчі властивості відображають властивості мінералу, який йому представляють гірничовидобувні підприємства. Останнім часом вимоги до якості руди стають все більш жорсткими. Здебільшого воно відносяться до якісних показників заліза магнітного і заліза в концентраті.

У процесі обґрунтування якості розглядається весь комплекс технологічних процесів, починаючи з видобутку, і закінчуючи отриманням і експлуатацією остаточного продукту.

Якість руд визначається умовами утворення родовищ. У кожному конкретному випадку склад і число показників якості залежить від характеру руди та особливостей технологічної схеми збагачення.

### **3.1 Геометризація якості корисних копалин у надрах**

Важливе значення у процесі виникнення коливань якості корисних копалин займає розміщення їх у просторі. У загальному випадку кожна компонента вектора якості змінюється під час переходу від однієї частини родовища до іншої, тобто є функцією точки у просторі. Таким чином, рудне тіло у просторі характеризується векторним полем якості, яке може бути задано табличним, графічним та аналітичним способами. При графічному способі завдання векторного поля якості геологічних планів і розрізах будуються ізолінії компонент якості (Рис. 3.1)



(рис. 3.1) Другий залізистих горизонт план -5м Глеєватського родовища

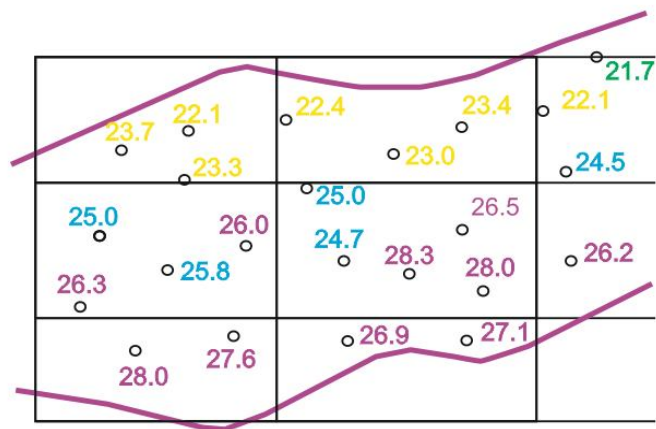
Геометризація якості корисних копалин, встановлюється на підставі закономірностей його зміни в просторі, та є необхідною передумовою для розрахунку параметрів усереднюючих систем.

Основою для складання проекту розробки родовища, який включає також вирішення питань щодо усереднення якості, є геологічні дані детальної розвідки. Детальна розвідка що проводиться до експлуатації родовища дає можливість отримати дані про форму рудного тіла, його розміри, якісну характеристику сировини, що розробляється. Похибки, пов'язані з оконтурюванням рудних покладів і геометризацією якості, за даними детальної розвідки, частково компенсуються за рахунок експлуатаційного випробування та технологічного картування, що проводиться на його основі. Експлуатаційна розвідка здійснюється за більш густою сіткою розвідувальних свердловин, яка забезпечує істотне підвищення достовірності геологічної інформації. Отримані на підставі даних детальної та експлуатаційної розвідки геологічні плани та розрізи забезпечують інформацію для складання річних, кварталних та місячних планів, гірничих робіт на кар'єрах та розробки проектів усереднюючих систем[18].

При організації оперативного управління процесом усереднення першорядне значення набувають поточні геолого-маркшейдерські роботи.

Основною метою поточного геолого-маркшейдерського обслуговування видобувних робіт є виділення різних різновидів залізистих кварцитів у надрах, визначення його якості в кожному блоці, та оперативний контроль за виконанням прийнятих рішень.

Геолого-маркшейдерськими службами кар'єрів Кривбасу в основному використовується графо-цифровий спосіб, який є комбінацією табличного та графічного способів. Сутність його полягає в тому, що на погоризонтні плани наносяться свердловини та значення показників якості (рис. 3.2).



(Рис. 3.2) Другий залізистих горизонт план -5м Глеєватського родовища.

Розглянуті вище способи геометризації якості руди враховують закономірності розміщення якісних показників, які виявляються у процесі відпрацювання родовища.

При розкритті причин виникнення коливань якості, зумовлених геологічною будовою та генезисом родовищ залізистих кварцитів, важливе значення мають форма та розміри покладів. Виділяють чотири групи рудних покладів.

До першої групи відносяться чітко витягнуті поклади пластоподібні, лінзоподібні або сплюснуті. Серед них розрізняють поклади з плоскою серединною поверхнею і паралельними лініями.

Друга група включає невитягнуті поклади пластоподібні, або плитоподібні. Аналогічно першій групі поклади цієї групи поділяються на дві підгрупи за ознакою кривизни серединної поверхні та характер ліній справжньої потужності.

До третьої групи відносяться витягнуті поклади веретеноподібні, трубоподібні та стовпоподібні. Серед них розрізняють поклади з прямолінійною та криволінійною віссю.

Четверта група характеризується кулястою формою. Якщо поверхня, що обмежує поклад, плавна опукла, то вона належить до першої підгрупи, якщо складно вигнута – до другої.

З формою рудних тіл тісно пов'язані закономірності розміщення якості у просторі. Розглядаючи один із найпоширеніших показників якості в умовах розробки залізистих кварцитів - вміст магнітного заліза, багато дослідників встановлювали фаціальне розміщення його в просторі. При такому розміщенні в центральній частині рудного тіла спостерігається найбільш високий вміст магнітного заліза, яке зменшується в напрямку до контакту покладу з порожніми породами.

На практиці родовища мають дещо інший вид:

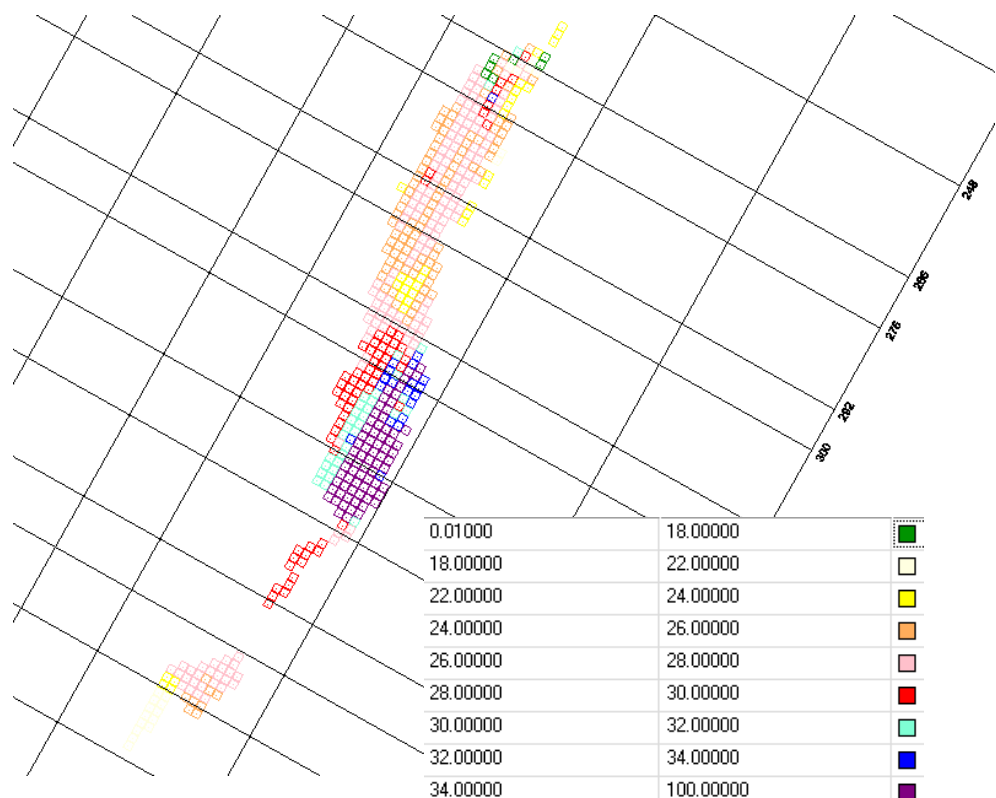
З 2004 року на підставі даних детальної та експлуатаційної розвідки були створені та постійно коригуються та оновлюються блокові моделі родовищ на основі геостатистичного методу зворотних зважених відстаней у гірничо-геологічній системі GEMS.

Метод зворотних зважених відстаней (МЗВ) визначає, що точки опробування, що знаходяться поблизу, впливають на якісні показники бі-

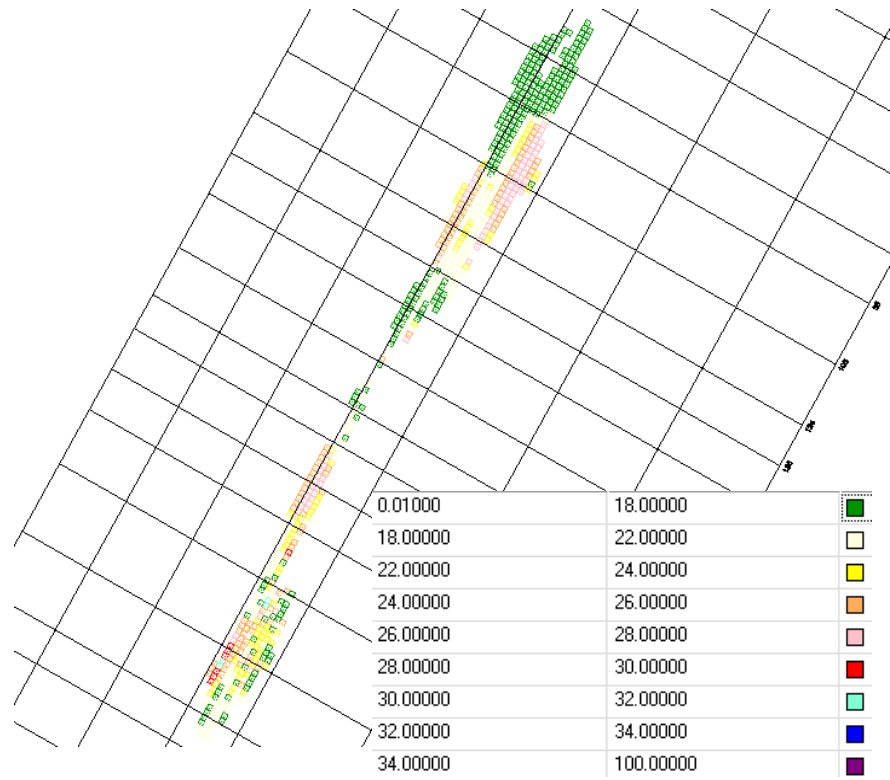


льше, ніж віддалені об'єкти. Щоб проінтерполювати значення для вимірюваної ділянки, ОВР використовує виміряні значення навколо розташування, що інтерполюється. Найближчі точки до інтерполюваного розташування надають більший вплив на значення, що прогнозується, ніж віддалені від нього на значну відстань. ОВР передбачає, що кожна виміряна точка надає локальний вплив, який зменшується зі збільшенням відстані. Це надає більшу вагу точкам, розташованим ближче всього до розташування, що інтерполюється. Вага крапки зменшується як функція від відстані.

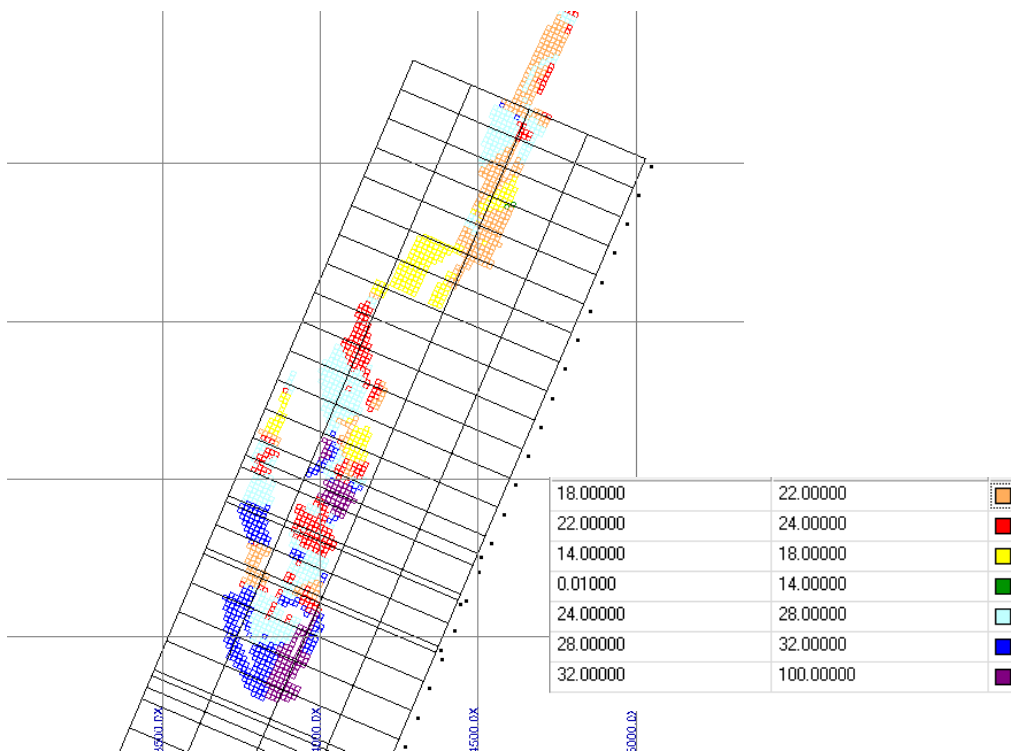
Для прикладу використовувалися родовища моноклінальні Ганнівське, Велика Глеюватка, Петрівське – за деякими джерелами, (рис 3.3-3.6);



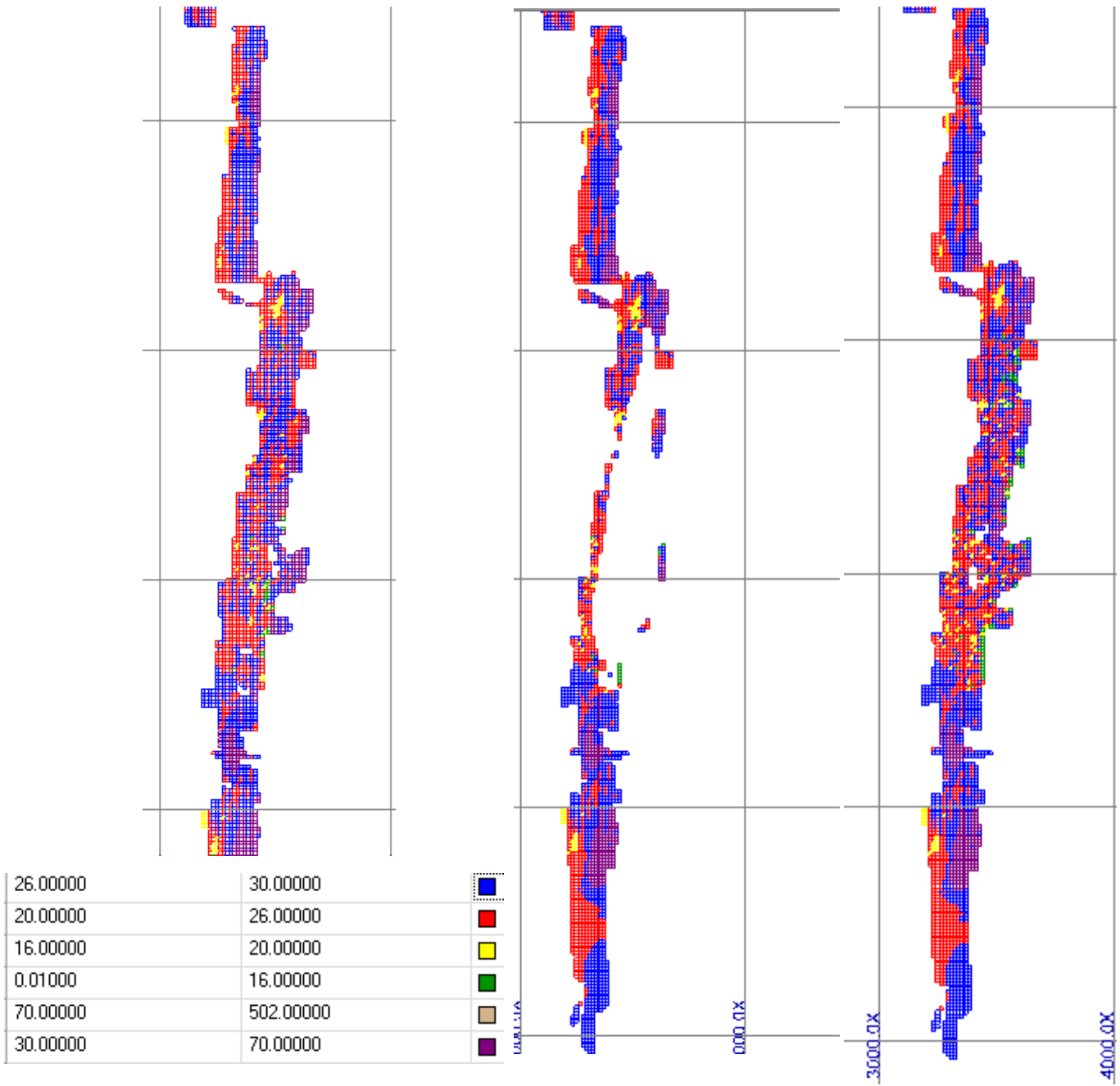
(Рис 3.3) 2 рудне тіло Глеюватського родовища план -235м.



(Рис 3.4) 4 рудне тіло Глеюватського родовища план -235м.



(Рис 3.5) Петрівське родовище план -210м железно магнитное



(Рис 3.6)Ганнівське родовище план -150м по залізу магнітному

Як видно з малюнків вище говорити про розміщення в центральній частині рудного тіла найбільш високих вмістів магнітного заліза, яке зменшується в напрямку до контакту покладу з порожніми породами не можна. З 3 родовищ, якийсь упорядкований розподіл корисного компонента можна побачити тільки на Ганнівському родовищі. Положення рудного тіла таке, що його верхня частина контактує з некондиційною пачкою і має найнижчий вміст заліза магнітного, а з опусканням до підосви рудного тіла збільшується вміст заліза магнітного.

Петрівське родовище як і родовище Велика Глеюватка мають вигляд зональності схожої з нерівномірно зернистою текстурою порід. Руда Петрівського родовища візуально ділиться на північ і південь, на півночі видно зміну якості, пов'язану зі значним впливом пегматитових дайок, які помітно знижують вміст заліза магнітного.

Крім того, південна частина 2 залізистого горизонту Глеюватського родовища, південна частина Петрівського родовища та центральна частина Ганнівського родовища були піддані більшій кількості експлуатаційного опробування відносно інших ділянок 3 наявних даних можна припустити, що розподіл корисного компонента може бути ще нерівномірним, ніж передбачалося раніше. У той же час ділянки, де використовувалися лише дані детальної розвідки (історичні свердловини), дійсно показують динаміку фаціального розподілу, як показують деякі автори. В подальшому автор планує виходячи з даних експлуатаційної розвідки проаналізувати закономірність розподілу корисного компонента по слабовивченим ділянкам. Можливим рішенням може бути групування проб по різних кондиціям із пошуком закономірностей у яких.

### 3.2 Вплив гірничих робіт на коливання якості корисних копалин

На величину амплітуди та частоти коливань якості корисної копалини, що відвантажується з екскаваторного блоку, впливають такі фактори, як розміщення якості в просторі (його мінливість), тип вантажного та транспортного обладнання та його продуктивність, потужність і порядок відпрацювання рудної товщі та ін. Як показує практика та результати моделювання, головними факторами у процесі виникнення коливань якості є розміри та форма рудного тіла, порядок його відпрацювання, а також розміщення якості у просторі. За наявності інформації про ці фактори можна дати кількісну оцінку амплітуді коливання якості та частоти.

У сформованому потоці корисних копалин, що відвантажується з вибою за час повторюється функція розміщення якості, тобто якість корисних копалин у потоці повторює його природне розміщення в надрах. Таким чином, при відпрацюванні правильних плаstopодібних покладів постійної потужності вхрест простягання та інших постійних умовах формується періодичний коливальний процес. Якість корисної копалини в одиничному потоці являє собою коливальний процес, який можна представити ряду Фур'є[10].. Можна стверджувати, що процес коливань якості прямо пропорційний продуктивності екскаватора і обернено пропорційний довжині екскаваторного блоку, висоті уступу і довжині екскаваторної заходки.

При відпрацюванні родовищ, які спираються на кілька якісних показників, методика визначення коливання якості не змінюється.

З викладеного вище випливає, що залежно від форми покладу, умов її відпрацювання виникає коливання якості.

| № зміни | Femag | № зміни | Femag | № зміни | Femag |
|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| 1       | 24,89 | 32      | 23,56 | 63      | 23,19 |
| 2       | 22,7  | 33      | 23,83 | 64      | 22,88 |
| 3       | 21,64 | 34      | 20,6  | 65      | 22,78 |
| 4       | 23,6  | 35      | 21,08 | 66      | 22,65 |
| 5       | 20,62 | 36      | 21,59 | 67      | 22,8  |
| 6       | 21,84 | 37      | 25,49 | 68      | 22,8  |
| 7       | 22,56 | 38      | 22,61 | 69      | 22,55 |
| 8       | 21,8  | 39      | 23,81 | 70      | 24,99 |
| 9       | 23,54 | 40      | 22,44 | 71      | 23,54 |
| 10      | 22,7  | 41      | 22,95 | 72      | 23,18 |
| 11      | 23,49 | 42      | 24,44 | 73      | 21,86 |
| 12      | 23,14 | 43      | 22,56 | 74      | 23,33 |
| 13      | 22,87 | 44      | 20,6  | 75      | 22,79 |
| 14      | 23,4  | 45      | 20,68 | 76      | 22,96 |
| 15      | 21,93 | 46      | 24,56 | 77      | 23,72 |
| 16      | 22,34 | 47      | 22,24 | 78      | 22,08 |
| 17      | 23,93 | 48      | 22,79 | 79      | 23,45 |
| 18      | 23,59 | 49      | 23,3  | 80      | 24,18 |
| 19      | 21,86 | 50      | 23,5  | 81      | 23,95 |
| 20      | 23,9  | 51      | 21,8  | 82      | 24,12 |
| 21      | 24,06 | 52      | 21,73 | 83      | 22,8  |
| 22      | 23,76 | 53      | 20,21 | 84      | 23,15 |
| 23      | 24,3  | 54      | 22,8  | 85      | 19,92 |
| 24      | 21,3  | 55      | 24,1  | 86      | 23,88 |
| 25      | 22,38 | 56      | 22,24 | 87      | 23,28 |
| 26      | 21,78 | 57      | 22,75 | 88      | 22,86 |
| 27      | 23,72 | 58      | 22,13 | 89      | 23,46 |
| 28      | 23,6  | 59      | 21,14 | 90      | 22,42 |
| 29      | 21,98 | 60      | 22,67 | 91      | 24,35 |
| 30      | 23,68 | 61      | 23,13 | 92      | 24,57 |
| 31      | 24,49 | 62      | 22,34 | 93      | 24,22 |

Таблиця 3.1 Вміст Femag що поступає на фабрику ЦГОК кар'єр №1



(Рис 3.7) Графік якісних показників по залізу магнітному по робочим змінам.

На прикладі вище наведено дані вмісту заліза магнітного в потоці, що надходять на фабрику цгоку кар'єр №1.

З наведених вище даних випливає, що коливання якості є низькочастотними, проте недоліком даної методики є незначний часовий проміжок, що використовується для аналітики. Цей проміжок не покриває всього родовища, а використовується на деяких його ділянках з припущенням, що інші ділянки мають схожі характеристики.

Виходячи із вищевказаного графіка можна зробити припущення про ручне корегування якісних показників при веденні видобутку. На графіку ми можемо бачити намагання утримати якісні показників в діапазоні 22-23%. Коливання на графіку скоріше за все вказують на недостатню вивченість якісних показників у зонах видобутку, і як наслідок постійне ручне корегування якісних показників при веденні видобутку. Середня якість по 93 змінам рівна 22.9%

Як показала практика, у разі підвищення вимог до якості корисного компонента коливання якісних показників може суттєво вплинути на планові об'ємно-якісні показники родовища. У 2021 році Інгок не зміг виконати планові показники за вмістом заліза в концентраті у зв'язку із мінливістю важкозбагачуваних різновидів у північній частині родовища. Для уточнення коливання якісних показників на сьогодні, більшість підприємств використовують блокові моделі з геостатистичним прогнозом якісних показників.

**Коливання якості сировини, що видобувається, та її характеристики, в залежності від порядку розробки.**

У процесі розвитку наукових досліджень про усереднення якісних показників корисних копалин склалися два основних напрямки в оцінці родовищ згідно коливанням якості та стабілізуючих властивостей усереднювальних комплексів. Представниками першого напрямку використовуються статичні оцінки коливань якості (середньоквадратичне відхилення), а представниками другого напрямку – динамічні оцінки коливань якості (кореляційні функції та спектральні густини). Обидва напрями не є суперечливими у підході до вирішення питань усереднення якості сировини, що видобувається, на гірничовидобувних підприємствах. Однак у більшості випадків значні відмінності виникають при розрахунку параметрів усередневих комплексів і систем (це в основному обумовлено тим, що в методах першого напрямку не враховується фактор часу, який має істотне значення у вирішенні розглядаємих питань). І лише окремих випадках результати двох напрямів збігаються[18].

Перші роботи зі статичних оцінок коливань якості корисних копалин у надрах було виконано П. Е. Бурковим, І. М. Костіним і Н. А. Нікольсь-



ким. Розроблена ними методика передбачала побудову гістограм розподілу основних компонентів, що характеризують якість руди, та отримання на їх основі числових характеристик різновидів руди – середнього змісту та середньоквадратичного відхилення. При цьому не враховувалися частота і період коливань.

В свою чергу С. Я. Арсеньєв і А. Д. Прудовський запропонували встановлювати закони розподілу усереднюючи компоненти, на діючих підприємствах шляхом статистичної обробки фактичних показників роботи. Закони розподілу ними виражаються у вигляді гістограми та інтегральної кривої. Шляхом моделювання роботи кар'єру авторами встановлюються середній вміст заліза в руді та середньоквадратичне відхилення:

під час роботи кар'єра без регулювання якості руди;

з урахуванням оптимального оперативного планування видобувних робіт та фактичної кількості екскаваторів;

те саме, з додаванням одного резервного екскаватора;

те саме, з додаванням двох резервних екскаваторів.

Для добової продуктивності кар'єру по руді 43,5 тис. т при якості руди 28,1 % отримано значення середньоквадратичного відхилення, що дорівнює відповідно 3,59, 2,18, 1,55 та 1,08%. Значення середньоквадратичного відхилення, що дорівнює 3,59, приймається авторами як базове, тобто як оцінка родовища за коливання якості.

Розвитком ідей оцінки коливань якості корисних копалин у надрах з використанням теорії ймовірностей з'явилися роботи, в яких враховуються середньоквадратичне відхилення статичних оцінок і частота коливань.

Складність питання введення динамічних характеристик коливань якості корисних копалин полягає в тому, що, крім середньоквадратичного відхилення, в оцінці коливань повинна брати участь частота. Це питання

зазвичай вирішується за даними випробування руди на приймальній лінійці дробильної фабрики або на зливі класифікатора. Виробляючи обробку цих даних відомими методами, можна отримати кореляційну функцію і через перетворення Фур'є знайти ампліудно-частотний спектр досліджуваного процесу коливань якості корисних копалин[18].

Однак отримані таким методом дані про амплітуду і частоту коливань не характеризують природної мінливості якості корисної копалини в надрах, так як опробування перед дробленням ведеться з порцій руди різних вибоїв, а опробування на зливі класифікатора - після змішування руд на склад у бункерах. Достовірної оцінки видобувних вибоїв та коливання якості на підставі такої інформації отримати не можна. Крім того, істотну роль при аналітичному описі кореляційної функції грає вибір формули наближення, від якої залежить частотний спектр. З зазначених вище причин отриману інформацію про амплітуду і частоту коливань можна лише частково використовувати для управління якістю корисних копалин на кар'єрах. Тому особливе значення в умовах розробки родовищ корисних копалин набуває питання про взаємозв'язок амплітуди і частоти коливань з геологічною будовою родовища, технічними характеристиками гірничого обладнання та технологією відпрацювання покладів. Вперше спробу встановлення такого взаємозв'язку зроблено П. П. Бастаном і М. М. Волошиним [18]. Ними розглядалася послідовність проб уздовж фронту екскаваторної заходки як деяка випадкова реалізація показників якості у фіксованому напрямку.

Зв'язуючи довжину блоку з тривалістю його відпрацювання, автори вперше оцінили деякі родовища по коливанню якості динамічними характеристиками - середньоквадратичним відхиленням і частотою. Отримані результати використовувалися в наступних роботах.

## **Визначення динамічних характеристик коливань якості під час відпрацювання крутих плаstopодібних покладів**

При аналізі взаємозв'язку показників коливань якості з геологічною будовою родовища і технічними характеристиками гірничого обладнання за певної технології відпрацювання крутих плаstopодібних покладів як динамічна характеристика використовується спектральна щільність, яка несе в собі інформацію про амплітуду і про частоту коливань. Важливе значення такої характеристики впливає із принципів функціонування усереднюючих комплексів. В результаті проходження потоку корисних копалин через усереднюючий комплекс змінювалася його спектральна щільність і числові характеристики коливань - їх амплітуда і частота. Для визначення динамічних характеристик коливань якості необхідно спочатку встановити діапазон частот коливань якості залежно від форми покладу та технології її відпрацювання, а також від функції розміщення якості корисних копалин, а потім розподілити дисперсії коливань якості за частотами встановленого діапазону.

Використання рекомендованої методики вимагає вирішення питання про числові значення нижньої і верхньої меж діапазону частот.

В роботі [18] виконано моделювання коливань якісних показників, що виникають при відпрацюванні покладів великої потужності (понад 200м). При розробці покладів потужністю >200 м видобуткові роботи на горизонті виконуються кількома екскаваторами. У межах потужності пласта корисних копалин фронт робіт на одному горизонті поділяється на два і більше екскаваторних блока. Так, при розробці рудної товщі потужністю

400м фронт видобувних робіт на горизонті, як правило, поділяється на два блоки(рис. 3.8), а при потужності покладу 600м - на три блоки і т.д.

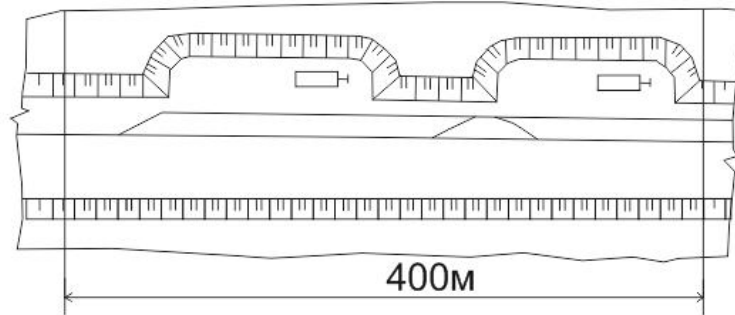


Рис 3.8 фронт видобувних робіт по рудній товщі потужністю 400 м

Залежно від потужності покладу та числа видобувних блоків на горизонті змінюються амплітудно-частотні характеристики коливань якості та поодиноких потоків. Розглянемо поклад горизонтальною потужністю 600 м і з параболічною функцією розміщення якості корисних копалин, що відпрацьовується трьома екскаваторами (рис. 3.9). Для таких умов період коливань якості корисних копалин в одиничних потоках першого і третього блоків у 2 рази більше, ніж період коливань у потоці другого блоку. При цьому амплітуда коливань у потоці другого блоку менше, ніж при відпрацюванні першого і третього блоків.

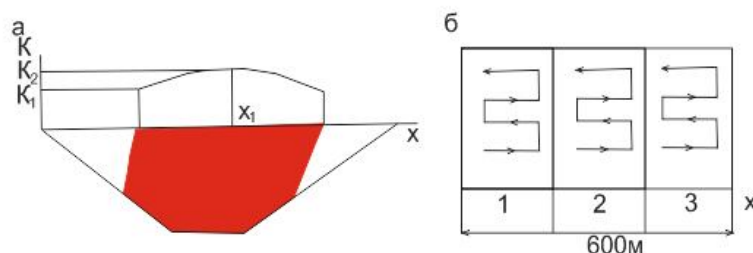


Рис 3.9 графік фаціального розміщення корисної копалини (а),  
Та порядок відпрацювання блоків (б)

У таблиці 3.2 наведено розрахункові значення амплітудно-частотних характеристик коливань якості при відпрацюванні покладу

потужністю 600 м трьома екскаваторами ЕКГ-5 продуктивністю 100 тис. м<sup>3</sup> на місяць при висоті уступу 15 м та ширині заходки 15 м.

| Номер гармоніки | Частота коливаль |         | Розподіл амплітуд коливаль (%) при значені □, % |      |      |      |
|-----------------|------------------|---------|---|------|------|------|
|                 | к/місяць         | ГЦ 10-7 | 8   | 12   | 16   | 20   |
| 2               | 2,22             | 0,86    | 2,88  | 4,33 | 5,77 | 7,21 |
| 4               | 4,44             | 1,71    | 0,36  | 0,54 | 0,72 | 0,9  |
| 6               | 6,66             | 2,57    | 0,32  | 0,48 | 0,64 | 0,8  |
| 8               | 8,88             | 3,43    | 0,4   | 0,17 | 0,23 | 0,31 |
| 10              | 11,11            | 4,29    | 0,09  | 0,14 | 0,18 | 0,28 |

Таблиця 3.2 розрахункові значення амплітудно-частотних характеристик коливаль відповідно до рис.3.9.

Така відмінність у колюванні якості викликана тим, що при розробці покладів великої потужності екскаваторний блок захоплює тільки її частину, і тому різниця між максимальним і мінімальним значеннями в блоці менша, ніж у цілому покладу. Мінімальні значення амплітуди коливаль якості корисних копалин при відпрацюванні покладів великої потужності (т = 600 м) спостерігаються в блоках, розташованих на центральній частині покладу. Так, при частоті коливаль 4,44 к/міс і  $6 = 8\%$  амплітуда коливаль дорівнює 0,36%, тобто приблизно в 7 разів менше, ніж при відпрацюванні крайніх (першого та третього) блоків.

Аналіз наведених вище даних показує, що нижня межа діапазону частот коливаль змінюється в широких межах залежно від потужності покладу, продуктивності екскаватора, параметрів екскаваторної заходки і функції розміщення якості корисних копалин. Так, для покладів потужні-

стю 200 і 100 м при місячній продуктивності екскаватора 100 тис. м<sup>3</sup> чисельні значення нижньої межі частот коливань рівні відповідно 4,44 к/міс.

Збільшення інтенсивності відпрацювання блоку шляхом застосування екскаватора ЕКГ-8 продуктивністю 200 тис. м<sup>3</sup> викликає зростання чисельного значення нижньої межі діапазону частот в 2 рази [18].

Автори дослідження пояснюють це тим, що функція розміщення якості корисних копалин у крайніх блоках несиметрична щодо центру покладу. Таким чином, нижня межа діапазону частот коливань якості корисної копалини залежить від потужності покладу, продуктивності видобувкового екскаватора, параметрів екскаваторної заходки та функції розміщення якості.

**Друге дослідження було засноване на коливанні якості при відпрацюванні покладу простягання.**

Вище було показано, що при відпрацюванні покладів вкrest простягання і постійних інших умовах якість руд в потоці характеризується періодичними коливаннями. Проаналізуємо, як змінюються амплітудно-частотні характеристики коливань якості в потоці у разі відпрацювання паралельними заходами простягання. Ширина заходок, зазвичай, приймається кратної потужності покладу. Розглянемо поклади потужністю 100 м особливості формування коливань якості при відпрацюванні кожної заходки. Порядок відпрацювання заходок при розробці покладу по простягання збігається з порядком відпрацювання покладу великої потужності вкrest простягання. Тому при відпрацюванні кожної заходки по простягання також виникають періодичні коливання якості корисних копалин, частота яких значно вища частоти коливань при відпрацюванні покладів великої потужності вкrest простягання [18].

У табл. 2.3 наведено розрахункові значення амплітудно-частотних

характеристик коливань якості руд при відпрацюванні покладу потужністю 100 м фланговими заходками по простяганню з використанням екскаваторів ЕКГ-4,6 та ЕКГ-8 продуктивністю відповідно 100 і 200 тис. м<sup>3</sup> на місяць (при висоті уступу 15 м).

| Номер гармоніки | Частота коливань при роботі екскаватора |          |         |          | Розподіл амплітуд коливань(%) при значенні □,% |      |      |      |
|-----------------|---|----------|---------|----------|--|------|------|------|
|                 | Екг-4,6                                 |          | Екг-8   |          | 8  | 12   | 16   | 20   |
|                 | ГЦ 10-7                                 | к/місяць | ГЦ 10-7 | к/місяць |  |      |      |      |
| 2               | 5,14                                    | 13,32    | 10,28   | 26,64    | 2,88   | 4,33 | 5,77 | 7,21 |
| 4               | 10,28                                   | 26,64    | 20,57   | 53,28    | 0,36   | 0,54 | 0,72 | 0,9  |
| 6               | 15,42                                   | 30,84    | 30,84   | 79,92    | 0,32   | 0,48 | 0,64 | 0,8  |
| 8               | 20,57                                   | 41,13    | 41,13   | 106,56   | 0,11   | 0,17 | 0,23 | 0,31 |
| 10              | 25,71                                   | 51,42    | 51,42   | 133,29   | 0,09   | 0,14 | 0,18 | 0,28 |

Таблиця 3.3 Розрахункові значення амплітудно-частотних характеристик коливань якості руд фланговими заходками

| Номер гармоніки | Частота коливань при роботі екскаватора |          |         |          | Розподіл амплітуд коливань(%) при значенні □,% |      |      |      |
|-----------------|---|----------|---------|----------|--|------|------|------|
|                 | Екг-4,6                                 |          | Екг-8   |          | 8  | 12   | 16   | 20   |
|                 | ГЦ 10-7                                 | к/місяць | ГЦ 10-7 | к/місяць |  |      |      |      |
| 2               | 10,28                                   | 26,64    | 20,57   | 53,28    | 0,36   | 0,54 | 0,72 | 1,08 |
| 4               | 20,57                                   | 53,28    | 41,13   | 106,56   | 0,09   | 0,14 | 0,18 | 0,27 |
| 6               | 30,84                                   | 79,92    | 61,7    | 159,84   | 0,04   | 0,06 | 0,08 | 0,12 |
| 8               | 41,13                                   | 106,56   | 82,26   | 213,12   | 0,02   | 0,03 | 0,04 | 0,06 |
| 10              | 51,42                                   | 133,2    | 102,83  | 266,4    | 0,01   | 0,02 | 0,03 | 0,04 |

Таблиця 3.4 Розрахункові значення амплітудно-частотних характеристик коливань якості руд центральної заходки

Як видно з табл. 3.3, при відпрацюванні покладу по простяганню виникають коливання якості корисних копалин високої частоти. Частота коливань основної гармоніки при відпрацюванні покладу екскаватором ЕКГ-4,6 дорівнює 13,32 к/міс, а при відпрацюванні екскаватором ЕКГ-8 - 26,64 к/міс. Для 10-ї гармоніки частота коливань дорівнює відповідно 66,6 та 133,2 к/міс. Ці значення частоти коливань за умов відпрацювання покладу є верхньою межею діапазону частот, так як амплітуди коливань при таких частотах не перевищують 5 % від амплітуд основної частоти. Найбільш високі значення частоти коливань якості спостерігаються під час відпрацювання центральної заходки (табл. 3.4). Так, при відпрацюванні центральної заходки екскаватором ЕКГ-4,6 частота коливань змінюється з 26,64 к/міс до 133,2 к/міс, а при відпрацюванні екскаватором ЕКГ-8 вона змінюється з 53,28 к/міс до 266 4 к/міс. Таким чином, у процесі відпрацювання покладів як хрест перепирання, так і простягання в потоці корисних копалин формуються періодичні коливання якості при обмеженні діапазону частот. Особливістю цих коливань є різний рівень частот: при відпрацюванні покладів по простяганню значення частоти коливань набагато вище, ніж при опрацюванні покладів вхрест простягання[18].

В цілому на залізорудних кар'єрах Кривого Рогу основними розглядаємим якісним показником був показник заліза магнітного та заліза загального. По ним проводяться кондиції, їх затверджують в ДКЗ України. Всі інші показники грали підпорядковану роль, та виступали в ролі позитивних або негативних показників при виробництві концентрату. За останнє десятиліття з кондицій при затвердженні запасів залізистих кварцитів було прибрано залізо загальне, та залишилося тільки залізо магнітне в якості головного чинника оцінки якісних показників руди. Проте більш-менш



розуміючи динаміку змін заліза магнітного по рудному тіло кожного з родовищ, ми погано розуміємо який концентрат з цієї руди буде отриманий. Часто буває що з руди з більш низьким вмістом заліза магнітного отримується більш якісний концентрат ніж з руди з більш високим його вмістом. Також слід зауважити, що останнім часом вся увага комбінатів прикута до показника заліза в концентраті.

Основною товарною продукцією комбінатів є залізорудний концентрат із вмістом заліза близько 65%. Починаючи з 2022 року, вимоги до якості концентрату підвищилися. Типовим прикладом відкритої розробки залізистих кварцитів у Кривбасі є Першотравневий кар'єр Севгока. Складчаста структура родовища, що розробляється, ускладнена численними порушеннями, що зумовили складну блокову будову родовища. Довжина окремих блоків простягання коливається від 50 до 300 м. Зміщення блоків один щодо одного коливається в межах 50-200 і 200-400 м відповідно в горизонтальному і вертикальному напрямках [17].

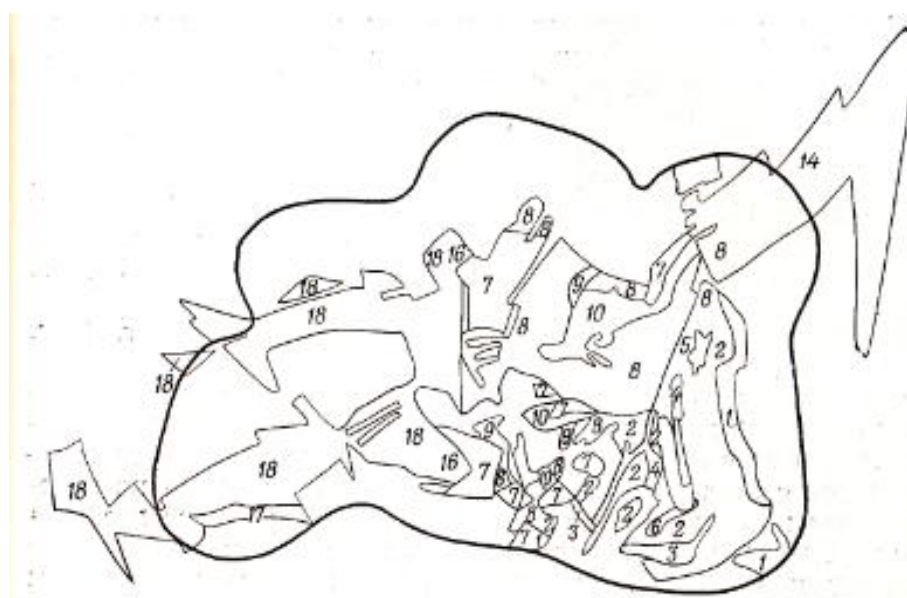
Промисловий інтерес становлять амфіболо-магнетитові кварцити п'ятого та залізистого горизонту.

Основні запаси промислових руд зосереджені у шостому залізистому горизонті, який простежується у вигляді західної та східної товщ (горизонтальною потужністю 100-500 та 200-800 м відповідно), розділених некондиційними за вмістом заліза магнетит-силікатними кварцитами сьомого. Амфібол-магнетитові неокислені кварцити є головним різновидом порід складових шостий залізистий горизонт. Вони вміщують пачки некондиційних силікатних та магнетит-силікатних кварцитів. Просторово виділити ці пачки неможливо у зв'язку з їх невеликою потужністю (менше 10м) і розташуванням у товщі без будь-якої закономірності. Обсяги їх у товщі амфіболіто-магнетитових кварцитів шостого залізистого горизонту становлять близько 4%. Середній вміст у руді магнітного та розчинного заліза дорівнює відповідно 25.95 та 34.11%

Щільність руди 3,35 т/м<sup>3</sup> коефіцієнт міцності руди за шкалою проф. М. М. Протодьяконова становить 12-16. Кварцити п'ятого залізного горизонту представлені невеликими ділянками горизонтальною потужністю 50 м.. Середній вміст у руді магнітного і розчинного заліза дорівнює відповідно 26,5 і 37,6%. Щільність руди 3,35 т/м<sup>3</sup>. Коефіцієнт міцності руди становить 10-16.

Промислові руди Первомайського родовища характеризуються наявністю великої кількості різновидів, збагачення яких залежить переважно від розміру зерен і агрегатів магнетиту у ній. У зв'язку з цим оцінити якість руди лише за вмістом у ній магнітного заліза неможливо.

З метою технологічної оцінки руд інститутом Механобрчермет та трестом «Кривбасгеологія» на Першотравневому кар'єрі виділено три ділянки, в межах яких виділено 18 різновидів руд (рис. 3.10). На рис. 3.10 цифрами позначено різновиди руд, що відповідають порядковому номеру різновидів у табл. 3.5[17].



**Рис 3.10 План горизонту 16м першотравневого кар'єра з розподілом різновидів руд(цифрами показані)**

| Порядковий номер | Різновиди руд                               | Вихід концентрата, % | Вміст заліза в концентраті % | Вміст заліза в руді % |
|------------------|---|----------------------|------------------------------|-----------------------|
| 1                | Амфіболо-магнетитові тонкошаруваті кварцити | 47                   | 65,5                         | 30,9                  |
| 2                | Амфіболо-магнетитові грубошаруваті кварцити | 43,6                 | 66,7                         | 28,8                  |
| 3                | Магнетит-амфіболові кварцити                | 31,7                 | 61,8                         | 17,41                 |
| 4                | Брекчій рудні                               | 45,5                 | 63,7                         | 31,5                  |
| 5                | Кумінгтоніт-магнетитові кварцити            | 38,3                 | 65,6                         | 24,8                  |
| §                | Егірін-магнетитові кварцити                 | 41,7                 | 57,9                         | 26,2                  |
| 7                | Амфіболо-магнетитові грубошаруваті кварцити | 42,5                 | 65,3                         | 28,2                  |
| 8                | Амфіболо-магнетитові тонкошаруваті кварцити | 47,7                 | 66,3                         | 29,4                  |
| 9                | Магнетит-амфіболові кварцити                | 31,7                 | 61,8                         | 17,4                  |
| 10               | Брекчій рудні                               | 41,8                 | 65,9                         | 27,7                  |
| 11               | Кумінгтоніт-магнетитові кварцити            | 38,3                 | 66,6                         | 24,8                  |
| 12               | Егірін-магнетитові кварцити                 | 41,7                 | 58,9                         | 26,2                  |
| 13               | Амфіболо-магнетитові кварцити               | 47                   | 65,5                         | 30,9                  |
| 14               | Амфіболо-магнетитові кварцити               | 43,3                 | 66,4                         | 26,9                  |
| 15               | Амфіболо-магнетитові кварцити               | 47,8                 | 66                           | 30,4                  |
| 16               | Амфіболо-магнетитові кварцити               | 42                   | 65,3                         | 27,7                  |
| 17               | Амфіболо-магнетитові кварцити               | 45,5                 | 67                           | 29,3                  |
| 18               | Амфіболо-магнетитові кварцити               | 38,7                 | 66,7                         | 25,9                  |

Таблиця 3.5 мінерологічні різновиди руд першотравневого родовища

З метою встановлення кількісних та якісних показників режиму гірничих робіт та доцільних кордонів кар'єру різновиду руд було виділено на планах 35 горизонтів Первомайського родовища. У масштабі 1:5000 було збудовано плани горизонтів. +115, +105, +95, +85, + 75, + 65, +53, +41, +29, +17, + 5, —7, —19, —31, —43, —55, —67, —79, —91, —103, —115, —127, —139, —151, —163, —175, —187, —237, —287, —337, —387, —437, —487, —537 та —587 м. Нижче за горизонт мінус 187 м по горизонтні плани будувалися через 50 м. [17].

У 1977-1987р на шахті першотравнева була виконана дорозвідка родовища Північно-Криворізькою ГРП, де були побудовані геолого-технологічні плани починаючи з -360м через 70 метрів( рис 3.11)



Рис. 3.11 Геолого-технологічний план першотравневої шахти, горизонт -430м.

На плані -430м ми можемо бачити якісний розподіл по показнику заліза в концентраті(довгий до 62%, зелений 62-64%, червоний 64-66% та синій поняд 66%). В цих зонах проводилось розділення також по мінеральному складу, наприклад поклад 6 синя зона ділиться на магнетитові та амфібол-гематит-магнетитові різновиди.

Отже для залізорудних кар'єрів Криворіжжя потрібна геолого-технологічна модель для нівелювання частоти якісних коливань при видобутку залізної руди. Збільшення уваги на показника заліза в концентраті, та відсутність його точної ув'язки з показником заліза магнітного, яке давало б достатню точність прогнозу потребує удосконалення діючих моделей родовищ. З усіх

ГЗК лише на Інгулецькому кар'єрі була виконана коректна модель по технологічним сортам руди. Було виділено 7 сортів руд та побудована технологічна блочна модель по них.

### **Висновки за розділом 3**

Сучасні умови розвитку добувних робіт потребують удосконалення у зв'язку з підвищенням якісних показників виробництва концентрату. Ефекти від зміни напрямку ведення робіт давно відомі та описані вище. Отже найбільш раціональний метод зменшення амплітуди коливань якості полягає у зменшенні невизначеності якісних показників руд. Для цього необхідно використати наявні блочні моделі на основі раніше отриманих даних у вигляді результатів розвідок, при необхідності виконати до розвідку з поглибленим вивченням технологічних різновидів руд, та скорегувати їх по результатам геолого-структурного картування з виділенням якісних та мінералого-петрографічних різновидів. Отримані результати можна використати можна використовувати як основу побудови геолого-металургічної моделі родовищ чем буде удосконалимо планування гірничих робіт.

## РОЗДІЛ 4

## РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ РУДИ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВІДКРИТОЇ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ

## 4.1 Сучасні методи імітаційного моделювання.

В останні десятиліття у світовій гірничій промисловості, у методах проектування та планування гірничо-збагачувального виробництва широко використовується геолого-технологічне блочне моделювання родовищ, системи короткострокового та довгострокового імітаційного моделювання та планування гірничих робіт у режимі управління якістю концентрату.

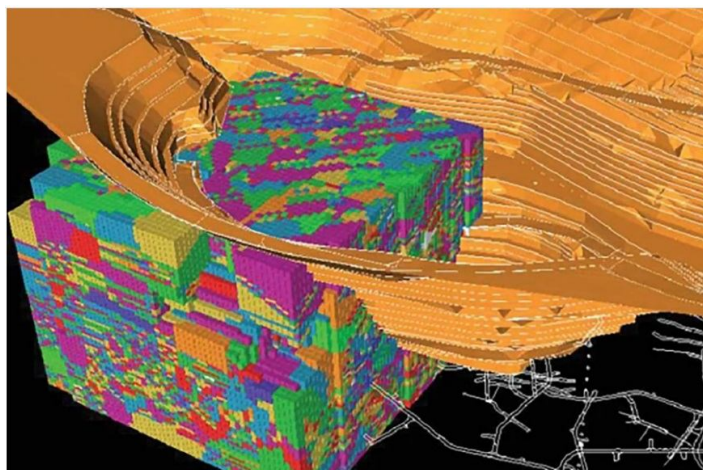
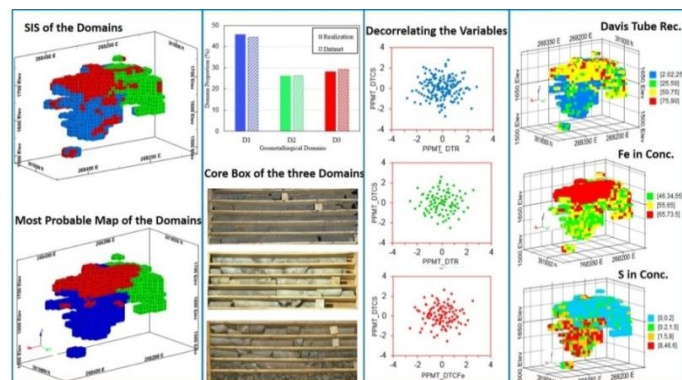


Рис 4.1 Приклад побудови цифрової моделі для планування гірничих робіт з урахуванням якості концентрату

Під геометалургійним моделюванням розуміється поглиблене вивчення мінливості геолого-мінералогічних характеристик та технологічних властивостей руди, моделювання варіантів розробки родовища та переробки руди для зниження ризиків та підвищення вилучення корисних компонентів.

Геометалургія поєднує у собі технологічну мінералогію, петрографію та визначення технологічних характеристик руд що дозволяє прогнозувати ефект роботи збагачувального переділу.

У світовій практиці гірничої справи було накопичено великий досвід успішного застосування геолого-технологічного моделювання для мінімізації ризиків на всіх стадіях проектування. Геометалургійне моделювання допомагає оцінити мінливість характеристик родовища з погляду міцності руди, процесів збагачення та флотації, а також концентрацій домішок у кінцевих концентратах. Такий підхід дозволяє проаналізувати різні варіанти схем переробки, а також оптимізувати роботу фабрики відповідно до короткострокових та довгострокових завдань.

Поглиблене дослідження мінералого-технологічних властивостей дозволяє розробити найбільш ефективні схеми збагачення шляхом моделювання циклів подрібнення та поділу продуктів, визначення оптимальної крупності подрібнення та прогнозування параметрів продуктивності збагачувального процесу, якості кінцевого концентрату та вилучення.

Геометалургійне моделювання дозволять підвищити ефективність роботи існуючого гірничо-збагачувального виробництва. Для переходу на нову методологію геолого-технологічної підтримки необхідне виконання дорозвідки родовищ із поглибленим вивченням технологічних властивостей руди, провести геолого-структурне картування, та на основі цих даних виконати побудову блокових моделей продуктивної товщі з урахуванням геолого-технологічних характе-

ристик, що дозволить забезпечувати ефективне планування гірничих робіт та прийняття оптимальних рішень.

Рекомендується наступний план підвищення ефективності гірничо-збагачувального виробництва:

1. Розробка комплексної програми геолого-технологічних досліджень;
2. Розвідка родовища, відбір проб щодо технологічних досліджень;
3. Аналіз вихідних геолого-мінералогічних даних, пошук закономірностей у розподілі у масиві родовища мінералого-технологічних ознак. Геолого-мінералогічне та технологічне картування родовища.
4. Розробка нових методів прогнозування ефективності роботи гірничо-збагачувального виробництва;
5. Оптимізація схеми відкритої розробки родовища. Обґрунтування технології усереднення руди за технологічними властивостями. Обґрунтування параметрів та положення системи усреднительных складів. Впровадження системи-планувальника гірничих робіт (RPMG OPMS, Deswik Scheduler або аналогів). Перевірка середньо- та довгострокових планів гірничих робіт щодо транспортних можливостей кар'єрів за допомогою систем імітаційного моделювання (RPMG HaulSim);
6. Оптимізація диспетчерської служби кар'єру. Впровадження методології оптимізації кар'єрних рудопаток за технологічними показниками. Впровадження цифрового двійника для оперативного імітаційного моделювання поточної роботи гірничо-транспортного комплексу з урахуванням якості рудопотоку (система ORCHESTRA).

Під визначенням «Геометаллургія» ми розуміємо оптимізацію шихтування шляхом наскрізного управління технологічним ланцюжком (Рудоуправління – Авто та залізничні перевезення – Збагачувальна фабрика) для отримання еконо-



мічних ефектів. Вони досягаються за рахунок зниження втрат у хвостах ММС та підвищення продуктивності секцій цеху збагачення.

#### **4.2 Базові принципи обґрунтування оптимального режиму роботи гірничо-збагачувального комбінату**

Показники поділу на збагачувальній фабриці в першу чергу визначаються технологічними властивостями сировини, що переробляється. Як ми бачимо, будь-яке залізорудне родовище неоднорідне за своїм якісним складом. Воно складається з різних за технологічними властивостями типів (сортів) руд, кількісні співвідношення між якими змінюються по глибині та площі родовища. Тому вимога до процесу збагачення зводиться насамперед, не до стабілізації вмісту металу в руді, а до стабілізації складу руди за технологічними різновидами. Як приклад можна навести багату за вмістом заліза тонко вкраплену, важкоподрібнювану руду яка буде по своїм технологічним показникам збагачування гірша, ніж руда з меншим вмістом заліза, крупнокраплена і легкоподрібнювана. [16]

При шихтуванні підбираються необхідні кількісні співвідношення різних руд, що становлять шихту. Вибір співвідношень сортів руд, які представляють шихту, повинен здійснюватися як пошук кращого рішення з безлічі можливих. Руда шихтується виходячи з вимог до технологічного процесу з переробки та фактичної кількості наявних продуктів для її формування.

Планування рудної шихти, що надходить з кар'єру на дробильно-збагачувальну фабрику, ведеться на кожному гірничо-збагачувальному комбінаті. Однак без геолого-мінералогічної моделі та гірничо-геологічної програми-планувальника вибір шихти випадковий, малообґрунтований і, головне, не оперативний. Довивчення родовищ, створення геометалургійної моделі дозволить

гірничо-збагачувальним комбінатам розглядати завдання вибору шихти як центральну в системі планування та оперативного управління гірничим та збагачувальним переділом [16]

Гірничо-геологічні умови родовища, фактичний стан гірничих робіт у кар'єрі, конкретна виробнича ситуація, що склалася в кар'єрі, призводять до того, що в кожен поточний відрізок часу виникають нові умови для вибору кількісних співвідношень між типами руд та їх відвантаженням. Вибір шихти завжди є багатоваріантним завданням. Залежно від виробничої схеми гірничо-збагачувального комбінату, запланованого періоду (місяць, зміна, година), та іншої мети має різний алгоритм рішення. Кількісні співвідношення складових шихти і вміст різних компонентів пов'язані балансовими рівняннями.

Залежно від постановки завдання, характеру наступного переділу шихти, прийнятої цільової функції, числа та типів обмежень та багатьох інших факторів математичне формулювання та модель завдання вибору шихти можуть мати безліч варіантів. Загалом принципова постановка завдання дуже проста.

На кар'єрі чи групі кар'єрів є  $m$  типів руд, розташованих у екскаваторних вибоях і перевантажувальних складах. Виходячи з можливості кар'єру, наявності підірваної та підготовленої гірничої маси, вимог до системи ведення гірничих робіт та інших факторів у запланований період може бути відвантажено обмежену кількість руди [16]

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} .$$

Показники збагачення на збагачувальній фабриці залежать від кількісних співвідношень у шихті типів руд

$$\gamma = f_1(x_1, x_2, \dots, x_m) ; \quad \beta = f_2(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

Необхідно вибрати таку кількість руд  $x_i$ , щоб задовольнити цільову функцію, яка в кінцевому вигляді залежить від показників збагачення [16]

$$\eta = f(\gamma, \beta) = \min(\max).$$

Насправді модель ускладнюється додатковими обмеженнями:

Кар'єр повинен виконувати план з гірничої маси, продуктивність фабрики обмежена та ін. Дуже складним питанням під час вирішення завдання є вибір цільової функції  $\eta$ . Складність полягає в тому, що потрібно оптимізувати модель одночасно за декількома (часто антогонуючи один одному) цілями. У таких випадках важко отримувати єдиний всеосяжний критерій ефективності процесу, який би пов'язував ці вимоги однією формулою. Пропонується наступна формула, що багато в чому відповідає цим вимогам і дозволяє планувати шихту за якістю  $\beta$  і кількістю  $N$  концентрату, що отримується з неї:

$$\eta = f(\gamma, \beta) = \min(\max)$$

$$\eta = a_1 \times \left( \frac{\beta - \beta_3}{\beta_3} \right)^k + a_2 \times \left( \frac{N - N_3}{N_3} \right)^k = \min$$

де  $a_1, a_2$  - вагові коефіцієнти;  $k$  - коефіцієнт, кратний двом. При більшому  $k$  цільова функція відповідає умові пошуку оптимуму методом максимальної невязки (мінімакс);  $\beta_3$  - задана (планова) величина якості концентрату;  $N_3$  - задане (планове) кількість концентрату[16].

### **Алгоритм формування шихти по збагачуваності руди в забоях**

За регресійним варіантом вибору шихти передбачається, що в результаті статистичної обробки даних встановлено зв'язок між вмістом окремих хімічних або мінеральних компонентів у сировині  $\alpha_j, j= 1, 2, \dots, n$  та показниками збагачення. Для ілюстрації приймемо лінійну залежність, хоча насправді вона не завжди така[16]:

$$\begin{aligned} \gamma_K &= \alpha_0 + a_1 \alpha_1 + a_2 \alpha_2 + \dots + a_n \alpha_n + a_{n+1} Q \\ \beta_K &= b_0 + b_1 \alpha_1 + b_2 \alpha_2 + \dots + b_n \alpha_n + b_{n+1} Q \end{aligned}$$

де  $Q$  – продуктивність секції.



Автоматичне визначення таких технологічних властивостей руди практично утруднене. Але ці властивості повною мірою виявляються у показниках збагачення. Тому вибір рудної шихти для збагачення має проводитися, з нашої точки зору, не за параметрами руди на вході, а за технологічними показниками на виході фабрики. Такий підхід до планування шихти заснований на визначенні технологічних властивостей кожного з типів тип руд та використанні складеної за цими показниками оперативної карти збагачуваності руд на кар'єрі[16].

#### **4.3 Система імітаційного та параметричного моделювання короткострокового планування гірничих робіт з урахуванням забезпечення дробильно-збагачувальної фабрики цільовою рудною шихтою**

Компанія RPMGlobal [7] узагальнила, переробила та вдосконалила методику планування відкритих гірничих робіт. Основа системи планування – гірничо-геологічна система Open Pit Metals Solution (OPMS).

Робота системи [7] базується на комплексі цифрових моделей родовищ, кар'єрів та розрахунків, виконаних у системах економічної оптимізації кордонів кар'єрів, середньо- та довгострокового планування гірничих робіт, на результатах оптимізації транспортної системи кар'єру з використанням методів імітаційного моделювання (рис.4.2).

Система знаходить рішення від окремої видобувної ділянки до ув'язування взаємодії всіх екскаваторних блоків, рудних складів та вантажопотоків на основі розробленого параметричного підходу до моделювання технології гірничих робіт. Технологія OPMS дозволяє підвищити обґрунтованість рішень щодо розвитку кар'єру та забезпечення ДОФ сировиною достатньої якості з урахуванням існуючих геологічних та технологічних обмежень.

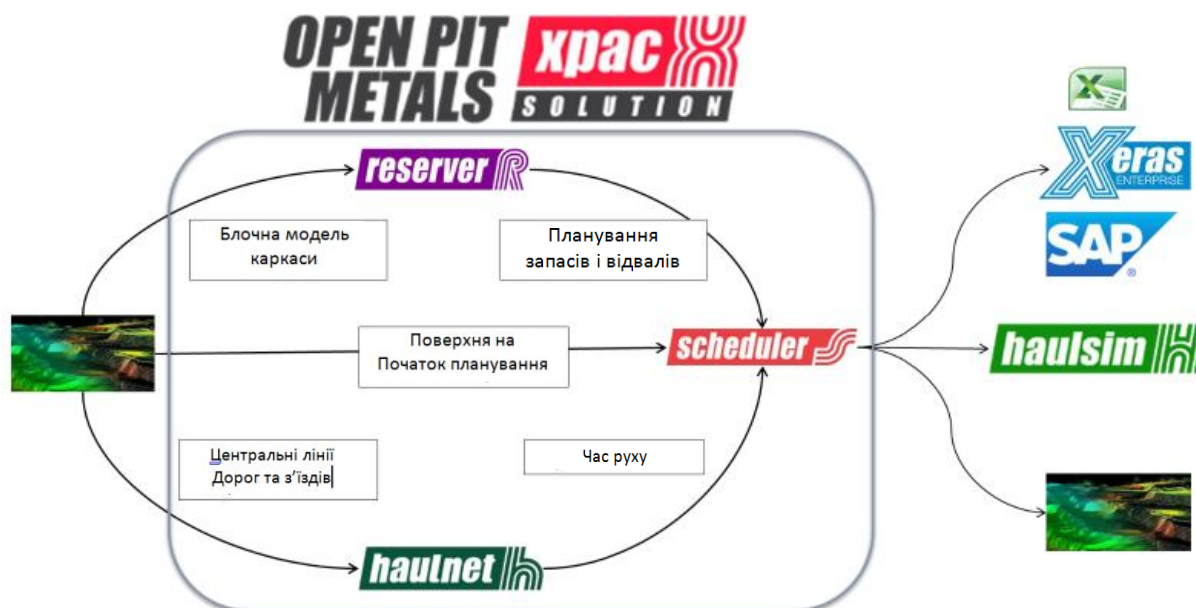


Рис 4.2. Структура системи OPMS

### Основні переваги

З використанням принципів та правил виробництва гірничих робіт система аналізує транспортний доступ та розробку кожного уступу з урахуванням вимог технологічних процесів. Система дозволяє оперативно змінювати обмеження на роботу гірничої техніки, цільові показники та виконати моделювання роботи кар'єру в режимі «що буде, якщо змінити обмеження».

### Зовнішні джерела залізорудної сировини

Відомо, що гірничо-збагачувальні комбінати за потреби у переробку можуть залучати залістисті кварцити родовищ інших гірничо-збагачувальних комбінатів (ця практика використовується з 60-х років минулого століття). Така схема переробки переважно є винятком. Але методологія OPMS дозволяє при наборі оптимальної шихти для збагачувального переділу використовувати руду з доступних вибоїв, пунктів перевантаження, складів руд з різною якістю, а також руду з інших кар'єрів або шахт.

Модель OPMS дозволяє оптимізувати вартість та якість кінцевого продукту, який буде отримано з руди кількох джерел. Ідея використання при шихтуванні кілька сировинних джерел не є новою. Але в сучасній теорії та практиці зарубіжної гірничої справи використання складів руди з різними технологічними властивостями є сталою практикою[7].

### **Багатосценарний аналіз**

Система передбачає опис інженером комплексу виробничих цілей із зазначенням їх пріоритету та допустимого діапазону варіювання меж технологічних показників. Повинні бути сформульовані правила розвитку гірничих робіт на уступах, у разі наявності технологічних обмежень на порядок відпрацювання на уступі блоків гірничої маси від в'їзної траншеї на горизонт, необхідно сформулювати комплекс технологічних обмежень на порядок розвитку гірничих робіт на горизонті. Особливістю системи є планування гірничих робіт на основі поетапної системи розробки з формуванням та відпрацюванням тимчасово-неробочих бортів раніше обґрунтованих та розроблених у системах стратегічного планування гірничих робіт.

Реалізований в OPMS алгоритм моделювання гірничих робіт на основі комплексу правил і обмежень забезпечує надзвичайно швидко швидкість планування, надаючи можливість гірничим інженерам зосередитися на оцінці переваг і недоліків варіантів плану, що набираються. При цьому генеровані рішення є технічно можливими і дотримуються заданої логіки видобутку. Таким чином, знімається залежність гірничо-збагачувального виробництва від єдиного варіанта короткострокового плану розвитку гірничих робіт, який гірничий інженер-планувальник розробив вручну за обмежений час. Система OPMS є інструментом для дослідження альтернативних сценаріїв короткострокового планування гірничих робіт з урахуванням відстеження відповідності гірничих робіт стратегічним цілям. Можливість швидкого набору та оцінки альтернативних варіантів

дозволяє отримати відповідь на питання про те, як найкраще управляти гірничозбагачувальним виробництвом у мінливих ринкових умовах[7].

### **Динамічне планування**

Система дозволяє при наборі плану гірничих робіт комбінувати, як ручні інтерактивні, і автоматичні методи планування, надаючи гірничим інженерам гнучкість у пошуку оптимального рішення, швидкість автоматичного планування під час вирішення складних, рутинних завдань. Незалежно від того, чи планує гірничий інженер вручну, автоматично або за допомогою комбінації обох методів, система автоматично керує переміщенням на відвали, а оптимізатор OPMS знаходить найкращий спосіб видобутку руди та управління складами руд різних сортів.

На даний момент система пошуку рішень щодо короткострокового планування гірничих робіт OPMS є єдиною системою, яка дозволяє порівнювати та знаходити такі варіанти відпрацювання екскаваторних блоків, які забезпечують реалізацію оптимальних рішень щодо послідовності розробки родовища, забезпечуючи гірничі підприємства економічно ефективним короткостроковим плануванням.

Система OPMS інтегрує результати попередніх етапів моделювання – цифрове моделювання родовища, економічна оптимізація кінцевих та етапних контурів, поетапне відпрацювання родовища для стабілізації розкриття, стратегічне та довгострокове планування, оптимізація розвитку схеми розкриття родовища.

На основі повного обліку даних про родовище, проектні рішення з розвитку, фактичний стан кар'єру та гірничотранспортного обладнання планувальник OPMS розробляє короткостроковий план гірничих робіт, який враховує розробку рудних та розкривних екскаваторних вибоїв, формування відвалів та складів, відвантаження руди зі складів та роботу транспортного обладнання.



Такий підхід до короткострокового планування дозволяє системи управління підприємством (Enterprise Planning Framework. Наприклад, система SAP) забезпечити необхідною вихідною інформацією на рівні взаємодії плануючих систем. Така особливість планувальника OPMS робить його єдиним рішенням у гірничій промисловості з повною підтримкою систем ERP та систем керування парком гірничо-транспортного обладнання[7].

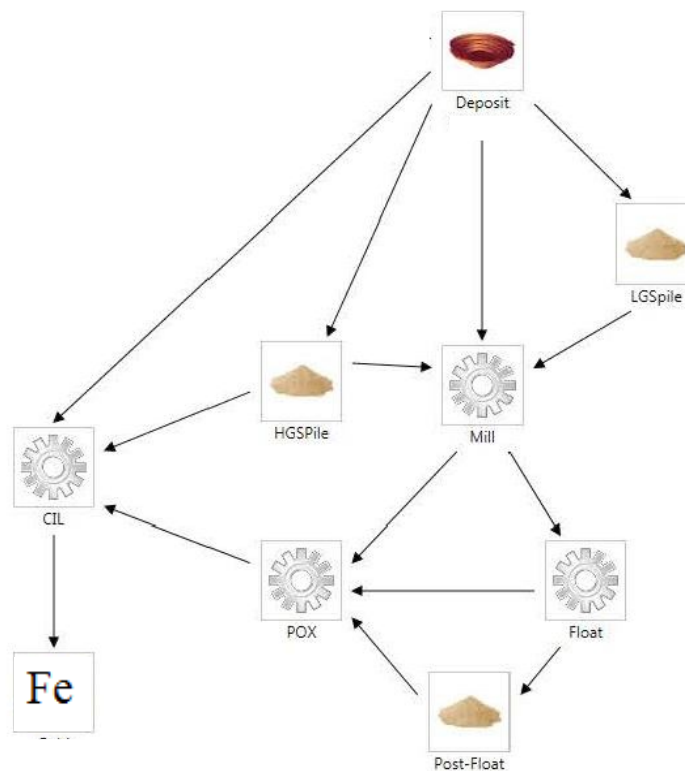


Рис.4.3 Схема грузопотоків гірничо-збагачувального комбінату

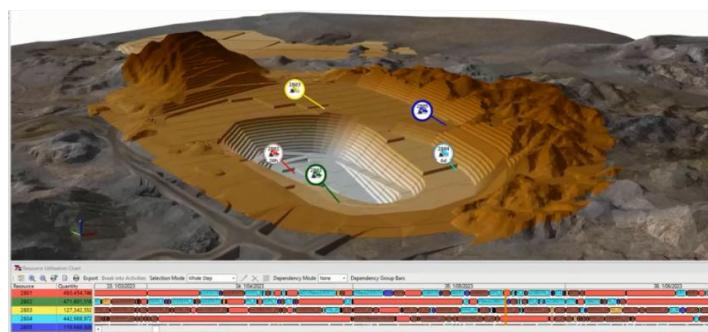


Рис.4.4 Процес моделювання послідовності відпрацювання родовища з урахуванням цільових показників якості руди.

## ВИСНОВКИ

У магістранській роботі поставлено та вирішено актуальне завдання підвищення ефективності управління якістю руди за рахунок удосконалення методів планування гірничих робіт на основі імітаційного моделювання, заснованих на використанні динамічної моделі геологічних та технологічних об'єктів гірничорудного виробництва.

Основні наукові та практичні результати, отримані особисто автором:

1. Підвищення достовірності, обґрунтованості та економічності коротко-строчкових планів розвитку гірничих робіт досягається за рахунок використання розробленої динамічної моделі геологічних та технологічних об'єктів гірничорудного виробництва, що дозволяє врахувати вимоги світового ринку до якості залізорудної сировини;

2. Обґрунтована необхідність розширення області використання при плануванні та проектуванні кар'єрів технологічних властивостей залізистих кварцитів.

3. Встановлені основні технологічних фактори гірничого виробництва, що мають значний вплив на якість кінцевої продукції гірничо-збагачувального комбінату. Надано рекомендації щодо зменшення негативного впливу цих факторів.

4. Виконано аналіз залежності змін техніко-економічних показників гірничо-збагачувального виробництва від напрямків розвитку гірничих робіт

5. Розроблено рекомендації з підвищення ефективності управління якістю руди на основі імітаційного моделювання відкритої розробки залізорудних родовищ. Сучасні гірничо-геологічні системи-планувальники (scheduler) є інструментом, що допомагає при плануванні гірничих робіт врахувати максимальну кількість факторів, що впливають на якість концентрату та техніко-економічні показники гірничо-збагачувального комбінату.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизація планування гірничих робіт на залізорудних кар'єрах/Ю.П.Астаф'єв, А.С. Давидкович, Н.Д.Бевз та інших.- М.: Надра,1982.-280 с.
2. Бизов В.Ф., Завсєгдашній В.О., Вілкул Ю.Г., Литвинов С.В. Автоматизована система "Кар'єр-1" для гірничо-геометричного аналізу на складноструктурних родовищах // Розроб. руд. родовищ : Респ. міжвід. наук.-техн. сб.- 1988.-Вип. 45.
3. Завсєгдашній В.О. Теоретичні та методологічні засади автоматизованого планування гірничих робіт залізорудних кар'єрів: Автореф. д-ра техн. наук: 05.15.03 / КТУ – Кривий Ріг, 1997. – 49 с.
4. Коробко В.М.Технологічні основи оптимізації розвитку гірничих робіт на рудних кар'єрах: Автореф. д-ра техн. наук: 05.15.03/КТУ– Кривий Ріг, 2002.– 31 с.
5. Комп'ютери та системи управління у гірничій справі за кордоном / Зеленський А.С., Горлов Н.І., Астаф'єв Ю.П. та ін - М.: Надра, 1989. - 264 с.: іл.
6. Критерій вибору триангуляції при наближенні поверхонь білінійними сплайнами / Бизов В.Ф., Завсєгдашній В.О., Максимов І.І.; Криворізь. гірничорудний. ін-т. -Кривий Ріг, 1982. – 5 с. - Рос.- Деп. у ВІНІТІ 29.09.82, N 5291.
7. Рекламний проспект компанії RPMGlobal ([www.rpmglobal.com](http://www.rpmglobal.com)) по системі Open Pit Metals Solution (OPMS)
8. Бизов В. Ф. Управління якістю продукції гірничих підприємств : в 14 т. : підручник для вузів за напрямком "Гірництво". Т. 8 / Бібліотека гірничого інженера. – Кривий Ріг : Мінерал, 2001. – 293 с.
9. Бизов В. Ф., Дриженко А. Ю. Відкриті гірничі роботи : в 14 т. : підручник для вузів за напрямком "Гірництво". Т. 13 / Бібліотека гірничого інженера. – Кривий Ріг : Мінерал, 2003. – 341 с.
10. Залізорудна промисловість очима міжнародних експертів. Вип. 1 / В. Ф. Бизов, В. П. Мартиненко, А. П. Станков ; Академія гірничих наук України. – Кривий Ріг : Мінерал, 1995. – 35 с.

11. Імітаційне моделювання гірничих процесів : учб. Посібник / В. Ф. Бизов. – Дніпро : ДГИ, 1979. – 95 с.
12. Ресурсозберігаючі технології видобутку корисних копалин на кар'єрах України [Текст] / А. Г. Шапар, А. Ю. Дриженко, С. З. Поліщук, В. Ф. Бизов ; НАН України, Ін-т проблем природокористування та екології ; під загал. ред. А. Г. Шапара. – К. : Наук. думка, 1998. – 91с.
13. Гірничо-графічна підсистема ієрархічної структури для задач автоматизованого проектування та планування на кар'єрах / В. Ф. Бизов, В. М. Коробко // Відомості Академії гірничих наук України. – 1998. – № 1. – С. 5-8
14. Критерії та методи оптимізації планування гірничих робіт на кар'єрах по сортам руд / В. Ф. Бизов, В. М. Коробко // Відомості Академії гірничих наук України. – 1998. – № 1. – С. 12-17.
15. Проектування інструментальних систем для аналізу та планування гірничих робіт у кар'єрі по технологічних сортах руд / В. Ф. Бизов, В. М. Коробко // Відомості Академії гірничих наук України. – 1997. – № 3. – С. 76-80.
16. Математичні моделі усереднення. Довідниковий посібник Л.П.Шупов т.- М.: Надра,1978.-287 с.
17. Визначення головних параметрів кар'єру з урахуванням якості руди / В. Г. Близнюков, .- М.: Надра,1978.-151 с.
18. Усереднюючі системи на гірничо-збагачувальних підприємствах/ В. Ф. Бизов, .- М.: Надра,1988.-213 с.
19. Hustrulid W., Kuchta M., Martin R. Open Pit Mine Planning & Design 3rd Ed. — CRC Press, 2013. — 1306 p. — ISBN13: 978-1-4822-2117-6.
20. Dimitrakopoulos R. (Ed.) Advances in Applied Strategic Mine Planning Springer, 2018. — 784 p. — ISBN: 978-3-319-69319-4.
21. Darrienne Thobaven Gemcom Software International, Strategic Mine Planning Surpac Whittle Perth, Western Australia, Gemcom Software International 2010.-316с.

22. Soofastaei Ali (ed.) *Advanced Analytics for Mining Industry* Springer, 2022. — 254 p. — ISBN 978-3-030-91588-9
23. Nguyen H., Bui X.N., Topal E., Zhou J., Choi Y., Zhang W. (eds.) *Applications of Artificial Intelligence in Mining and Geotechnical Engineering* Elsevier, 2023. — 448 p. — ISBN 978-0443187649.
24. Elbeblawi M.A.I., Elsaghier H.A.A., Amin M.T.M., Abdellah W.R.E. *Surface Mining Technology* Springer, 2022. — 360 p. — ISBN 978-981-16-3567-0.
25. Herrmann J.W. *Handbook of Production Scheduling* Springer, 2006. — 330 p. — ISBN: 0387331158, 9780387331171
26. Kennedy B.A. *Surface Mining* 2nd edition. Colorado, United States: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 1990. - 1206 p. - ISBN10: 0873351029; ISBN13: 9780873351027
27. Aaron Loffler *Gemcom Minesched* Perth, Western Australia, Gemcom Software International 2010.-259c.
28. *Steel: From Mine to Mill, the Metal That Made America* Zenith Press, 2015. — 304 p. — ISBN13: 978-0760347423.