

УДК 622.271

[https://doi.org/10.31474/2073-9575-2024-1\(31\)-2\(32\)-39-48](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2024-1(31)-2(32)-39-48)Ю.І. Григор'єв
Ю.А. Монастирський
О.В. Плотніков
О.П. Богомаз

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ГІРНИЧИХ РОБІТ, КОНФІГУРАЦІЇ ПОКЛАДУ І ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ РОЗРОБКИ ПРИ ЗМІННІЙ ЦІНІ НА ПРОДУКЦІЮ ГІРНИЧОДОБУВНОГО КЛАСТЕРУ

Мета. Дослідження впливу динамічного мінімального вмісту корисного компоненту на параметри системи відкритої розробки крутоспадного родовища та оптимізацію режиму гірничих робіт в умовах змінної кон'юнктури ринку залізорудної продукції.

Методика. У роботі використано метод інженерного аналізу, синтезу і узагальнення інформації різних літературних джерел, було проведено багатоваріантне моделювання гірничо-геометричних параметрів родовища.

Результати. Аналіз наукових досліджень дозволив сформулювати теоретичні засади та математичні підходи до управління режимом гірничих робіт у контексті динамічної зміни ринкових умов на продукцію гірничодобувних підприємств. Для забезпечення гнучкої адаптації виробничої системи кар'єру запропоновано застосовувати динамічний мінімальний вміст корисного компоненту. Виконано аналітичне обґрунтування ключових параметрів системи розробки - ширини робочої площадки та довжини рудного фронту. Розрахунки продемонстрували, що зі зростанням динамічного мінімального вмісту корисного компоненту ширина робочої площадки збільшується, а довжина рудного фронту зменшується через перекласифікацію частини рудних уступів як розкритих. Змодельовано варіанти режиму гірничих робіт залежно від значень динамічного мінімального вмісту корисного компоненту. Отримані результати можуть бути використані для розробки календарного плану гірничих робіт у мінливих умовах зовнішнього середовища.

Наукова новизна. Запропоновано поняття динамічного мінімального вмісту корисного компоненту як адаптивного інструменту для оперативного управління гірничими роботами в умовах змінних ринкових факторів. Обґрунтовано залежність ширини робочої площадки від взаємодії між якісними показниками руди та кутом відкосу робочого борта.

Практичне значення. Розроблені підходи дозволяють підвищити гнучкість виробничої системи кар'єру, знизити витрати на формування робочих площадок та покращити економічну ефективність роботи кар'єру за умов мінливої кон'юнктури ринку залізорудної продукції.

Ключові слова: динамічний мінімальний вміст, динамічні умови зовнішнього середовища, режим гірничих робіт, ширина робочої площадки, кут відкосу борта, фронт гірничих робіт.

Вступ.

В сучасних умовах функціонування гірничодобувних підприємств визначальним фактором довгострокового успіху є здатність оперативно адаптувати параметри відкритих гірничих робіт до динамічних змін зовнішніх ринкових умов. Коливання цін на мінеральну сировину суттєво впливають на прийняття стратегічних і тактичних рішень щодо параметрів гірничих робіт, конфігурації родовищ та технологічної послідовності їх розкриття і відпрацювання. Зміна вартості кінцевої продукції гірничодобувного кластеру не лише визначає економічну доцільність тих чи інших варіантів відпрацювання, але й ставить перед проектувальниками завдання оптимізації системи розробки в контексті максимально

раціонального використання ресурсів, підвищення стійкості до негативних ринкових коливань та забезпечення стабільного прибутку.

Розробка інтегрованих підходів до дослідження взаємозв'язків між параметрами режиму гірничих робіт, морфологією покладу (його формою, розмірами, умовами залягання) та параметрами системи розробки, останніми роками стала актуальним напрямом гірничої науки і практики. Формування аналітичних моделей, які враховують складну нелінійну взаємодію факторів, підпорядкованих багатомірним невизначеностям та стохастичним впливам, дасть змогу гірничим підприємствам гнучко реагувати на мінливість ринку. Зокрема, інтегровані дослідження забезпечують

можливість побудови адаптивних сценаріїв гірничих робіт, у яких, виходячи з коливань ціни на продукцію, відбувається коригування швидкості, глибини, напрямку та технології відпрацювання покладів.

Аналіз досліджень і публікацій.

Продовжуючи розгляд теоретичних засад та практичних підходів до адаптивного управління гірничими роботами, слід зупинитися на тих моделях, які безпосередньо визначають критерії економічної доцільності розробки конкретних ділянок родовища при змінній ціні на продукцію. Відправною точкою в цьому аспекті є концепція мінімально допустимого (граничного) вмісту корисного компоненту. На сьогоднішній день сформовано дві базові моделі для визначення граничного вмісту: модель безбитковості та модель Лейна. Перша з них описує стан рівноваги між сумарними доходами та витратами, пов'язаними з видобутком і переробкою руди, фіксуючи граничний вміст корисного компоненту на рівні, за якого видобуток стає економічно нейтральним [1, 2]. Недоліком такої підходу є його статичність: він не враховує ані внутрішньої структурної неоднорідності родовища, ані зміни виробничих потужностей у часі. Це призводить до фіксації бортового вмісту на одному рівні протягом усього періоду експлуатації.

На противагу цьому, модель Лейна є динамічнішою та враховує низку додаткових параметрів: нерівномірний розподіл корисних компонентів по об'єму рудного тіла, гнучкість виробничих ліній та можливість адаптації системи відпрацювання до зміни зовнішніх умов [2, 3]. Вона має на меті максимізацію чистого приведенного доходу (NPV) з урахуванням існуючих обмежень. Саме завдяки такій комплексності модель Лейна краще адаптується до реальних гірничодобувних систем із широким спектром технологічних та економічних варіацій.

Подальші дослідження вдосконалюють цю модель. Так, Осанлу та Атаї [4] вводять поняття еквівалентного коефіцієнта вмісту до моделі Лейна, перевіряючи ефективність свого підходу на мідно-молібденовому родовищі. У подальших їхніх роботах [5] розглянуто застосування генетичного алгоритму, методу золотого перетину,

техніки пошуку по сітці та методу еквівалентних вмістів для визначення оптимальних параметрів.

Розширення функціональності моделі Лейна не обмежується одновимірним сценарієм. Наприклад, Асад [6] досліджує управління запасами у випадках динамічного бортового вмісту та впроваджує алгоритмічний підхід, що включає формування та вилучення техногенних родовищ. Четін і Дауд [7] застосовують модель Лейна до родовищ, які містять більше ніж два види корисних копалин, використовуючи алгоритми пошуку по сітці для визначення оптимального режиму гірничих робіт. Ньето та Чжан [8] вносять у модель розподіл еквівалентних вмістів і здійснюють аналіз чутливості до варіацій цін на побіжні компоненти, що підтверджує гнучкість та стійкість підходу до різних ринкових ситуацій.

Однак варто підкреслити, що початкові формулювання як моделі безбитковості, так і моделі Лейна здебільшого розглядають ціну на метал та об'ємно-якісні характеристики родовища як детерміновані параметри. Насправді ж ці чинники вкрай мінливі: ціна продажу металу та розподіл вмісту корисних компонентів по тоннажу можуть змінюватися зі зміною ринкової кон'юнктури. Історично перші спроби врахувати ймовірнісну природу таких параметрів зроблені Доудом [9], який запропонував стохастичне програмування із застосуванням матриці перехідних ймовірностей. Пізніші дослідження Крауткремера [10] поглибили розуміння впливу цінових змін на граничний вміст, включаючи можливість зниження якості руди. Мардонес [11] використав опційний підхід, що дозволяє коригувати політику визначення граничного вмісту залежно від очікуваних цінових сигналів, а група під керівництвом Джонсона [12] застосувала методи розв'язку часткових диференціальних рівнянь для розрахунку динамічної політики в умовах ринкової невизначеності. Асад та Дімітракопулос [13] розширили модель Лейна до стохастичної структури, здатної враховувати невизначеність щодо вмісту металу і управління кількома потоками переробки. Подальші дослідження [14] доповнили цю парадигму багатокритеріальними підходами,

хоча й без урахування специфіки накопичення техногенних родовищ як інструменту адаптації до мінливих умов.

Окрім стохастичних підходів, активно застосовуються методи математичного програмування. Зокрема, змішане цілочисельне лінійне програмування, запропоноване Дагделеном та Кавахатою [15], визначає оптимальний бортовий вміст для складних гірничих ситуацій, враховуючи відвали, складування та різну якість сировини. Роботи колективу під керівництвом Гангулі [16] та Мусаві [17] продовжують цю лінію досліджень, створюючи комплексні моделі, що мають на меті максимізувати NPV, оптимізувати послідовність відпрацювання та забезпечувати необхідний рівень якості рудної шихти.

Постановка завдання.

Проведений аналітичний огляд виявив нагальну необхідність сформувати методологічний підхід до визначення оптимальних параметрів режиму гірничих робіт, який передбачав би здатність гірничодобувної системи оперативно адаптуватися до мінливих кон'юнктурних умов на залізорудну продукцію. Зокрема, низка розглянутих наукових праць, виконаних як вітчизняними, так і зарубіжними дослідниками, вказують на доцільність динамічного коригування середнього вмісту корисного компонента у руді у разі зміни її ринкової вартості, що у перспективі призводить до максимізації чистого приведенного прибутку.

Основні результати.

Виходячи з окресленої концепції, пропонується, щоб виробнича система кар'єру динамічно реагувала на коливання вартості залізорудного концентрату шляхом оперативного коригування мінімального вмісту корисного компонента, з яким руда надходить на збагачувальну фабрику. Для цього введемо поняття «динамічного мінімального вмісту». Таким чином, видобута сировина, що має вміст корисного компонента вищий за бортовий, але нижчий за визначений динамічний мінімальний рівень, розміщується у техногенному родовищі з подальшим наданням статусу умовно-балансової, а її відпрацювання доцільно здійснювати під час більш сприятливої цінової кон'юнктури [18].

Розв'язання даної проблеми має базуватися на визначенні оптимального режиму гірничих робіт [19]. Далі на прикладі умовного крутоспадного родовища пропонується розглянути дану методику.

Перш за все для розглянутих типових гірничо-геологічних умов необхідно побудувати кінцеве положення гірничих робіт.

Початковим етапом при формуванні раціонального режиму гірничих робіт є детальний гірничо-геометричний аналіз об'єкта розробки. Для цього виконується багатоваріантне моделювання конфігурації родовища від денної поверхні до проектного кінцевого контуру для змінних рівнів динамічного мінімального вмісту корисного компонента в рудній сировині. Зокрема, на рис. 1а представлено просторову модель родовища за умов, коли вміст корисного компонента становить 10%, а на рис. 1б наведено конфігурацію при збільшенні цього показника до 20%. Загалом, у ході проведення гірничо-геометричного аналізу було здійснено моделювання шести різних сценаріїв, що відповідали мінімальному вмісту корисного компонента від 10% до 20%.

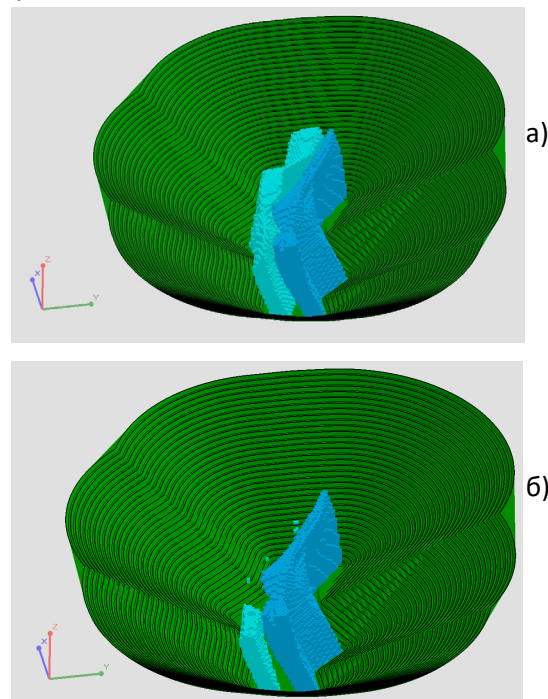


Рис. 1. Відпрацьований вид кар'єру, що розробляє характерне крутоспадне родовище при динамічному мінімальному вмісті 10% (а) і 20% (б)

Для визначення потенціалу оптимізації режиму гірничих робіт для кожного з розглянутих варіантів вмісту корисного компоненту здійснюється моделювання просторово-часового розвитку гірничих робіт із урахуванням двох граничних умов за кутом відкосу робочого борта кар'єру.

Однак, в процесі обґрунтування раціональних параметрів системи розробки виникає проблема визначення оптимального кута відкосу робочого борта кар'єру, яка нерозривно пов'язана з вибором ширини робочого майданчика. Відомо, що ширина робочої площадки як ключовий параметр системи розробки чинить суттєвий вплив на режим гірничих робіт та, зрештою, і на сукупні економічні показники експлуатації родовища. При виборі ширини площадки враховують механічні та фізичні характеристики гірських порід, вимоги безпечної експлуатації виймально-навантажувального і гірничо-транспортного обладнання, а також необхідну продуктивність кар'єру. Відповідно до діючих норм технологічного проектування, ширина робочої площадки повинна включати простір для формування оперативного запасу гірничої маси, підготовленої до виймання, при цьому кількість цих запасів, як правило, нормується щонайменше на 1,5 місяця роботи. Забезпечення ширини робочого майданчика, яка б гарантувала створення нормативних запасів сировини, часто перетворюється на складне технологічне завдання, оскільки розширення площадки до необхідних розмірів призводить до значного збільшення затрат на ведення гірничих робіт.

Варто зауважити, що наявність необхідних готових до виймання запасів, визначених за продуктивністю кар'єру, зазвичай не враховує якісних характеристик руди. У низці досліджень [7] було здійснено спробу врахувати якісний склад руди при обчисленні ширини робочого майданчика, спираючись на один із технологічних показників переробки — вихід концентрату. Такий підхід мав на меті виявлення впливу якісних параметрів руди на вибір напрямку розкриття та особливості ведення гірничих робіт у кар'єрі. Проте у проаналізованих роботах не розглядалося вмісту заліза ані в самій руді, ані в кінцевому концентраті, а отже, увага зосереджувалася виключно на забезпеченні визначеної кількості

концентрату, який можна отримати з відповідних запасів.

Таким чином, нормальна ширина робочого майданчика у загальному вигляді може бути розрахована за формулою:

$$B_n = B^{\min} + \frac{A_p \cdot \mu}{L_p \cdot h_p}$$

де A_p – продуктивність кар'єра по руді, м³/рік;

μ – нормативний коефіцієнт готових до виймання запасів руди ($\mu = 0,21$), долі од.;

L_p – довжина активного рудного фронту робіт, м;

h_p – висота рудного уступу, м.

Якщо представити обсяги видобутку руди через обсяг виготовленого концентрату, отримаємо формулу:

$$B_n = B^{\min} + \frac{K \cdot \mu}{\gamma_k \cdot L_p \cdot h_p \cdot \rho_p}$$

Враховуючи, що вихід концентрату, вмісту в ньому і вихідній руді заліза магнітного пов'язані виразом:

$$Fe_k = \frac{Fe_p \cdot \varepsilon \cdot a}{\gamma_k}$$

де ε – коефіцієнт захвату, долі од.;

a – коефіцієнт вилучення, долі од.,

нормальна ширина робочої площадки може бути представлена у вигляді виразу:

$$B_n = B^{\min} + \frac{K \cdot \mu \cdot Fe_k}{Fe_p \cdot \varepsilon \cdot a \cdot L_p \cdot h_p \cdot \rho_p}$$

Підвищення бортового вмісту корисного компоненту неминуче спричинить зростання середнього вмісту заліза у руді, яку видобувають у кар'єрі. Внаслідок цього при сталій річній виробничій програмі з випуску концентрата його якість може змінюватися для різних варіантів режиму гірничих робіт. З огляду на це, під час визначення ширини робочої площадки слід застосовувати універсальний для всіх можливих рівнів бортового вмісту критерій — масу металу,

яку можна одержати з відповідного обсягу концентрату. Такий підхід до порівняння варіантів є коректним ще й тому, що добуток величин, наведений у чисельнику останньої формули, фактично відображає масу металу M , потенційно доступного з відповідного обсягу концентрату. З урахуванням наведених аргументів, нормальна ширина робочої площадки може бути представлена у вигляді виразу:

$$B_n = B^{\min} + \frac{M \cdot \mu}{Fe_p \cdot \varepsilon \cdot a \cdot L_p \cdot h_p \cdot \rho_p}$$

Окрім якісних характеристик руди та концентрата, вагомий вплив на величину робочої площадки справляє протяжність рудного фронту гірничих робіт. Із збільшенням бортового вмісту заліза довжина цього фронту скорочується, оскільки частина в минулому рудних уступів пере класифіковується до уступів по розкритих породах. Отже, зміна динамічного мінімального вмісту заліза чинить комплексний і неоднозначний вплив на формування розрахункових параметрів елементів системи розробки.

Для подальшого вивчення залежності між динамічним мінімальним вмістом заліза, шириною робочої площадки та відповідним режимом гірничих робіт звернемося до проаналізованого раніше родовища (рис. 1), що експлуатується із базовим бортовим вмістом заліза магнітного в руді $Fe_p^0=10\%$.

Базові параметри системи розробки для такого рівня бортового вмісту наведені у таблиці 1. Обрані параметри забезпечують річний видобуток руди та обсяги виробництва концентрата, які в сукупності дають змогу отримувати 4,9 млн т металу. За довжини рудного фронту $L_p=8000$ м розрахункова ширина робочої площадки становить $B_n=42,7$ м.

Проведені розрахунки об'ємно-якісних характеристик видобутої руди для різних значень мінімального вмісту корисного компоненту засвідчили тенденцію до підвищення середньої концентрації заліза як у самій руді, так і в кінцевому концентраті. Такий якісний перерозподіл безпосередньо впливає на зменшення довжини активного рудного фронту (таблиця 1). У разі, коли кількість металу у залізородному концентраті фіксована для всіх порівнюваних варіантів, зростання ширини робочої площадки відбувається, насамперед, через скорочення рудного фронту. Попри те, що у наведеному прикладі незначні обсяги низькосортної руди не дають істотного резерву для підвищення середнього вмісту заліза за рахунок збільшення бортового вмісту, навіть за таких умов спостерігається зростання ширини робочої площадки. Отримані величини ширини робочих площадок відкривають можливість формування робочих бортів із заданими кутами відкосів для подальшого дослідження змін у режимі гірничих робіт.

Табл. 1. Визначення параметрів елементів системи розробки при зміні динамічного мінімального вмісту корисного компоненту

Найменування показника	Од. вим.	Значення динамічного мінімального вмісту заліза в руді					
		10%	12%	14%	16%	18%	20%
Кількість металу у виробленому концентраті (M)	млн т	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Вміст заліза магнітного в руді (Fe_p)	%	21,34	21,99	22,61	24,14	26,32	27,2
Коефіцієнт μ		0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
Довжина рудного фронту (L_p)	м	8000	7700	7200	6500	5900	5200
Висота уступу (h_p)	м	15	15	15	15	15	15
Мінімальна ширина робочої площадки (B_{\min})	м	31	31	31	31	31	31
Нормальна ширина робочої площадки (B_n)	м	42,7	42,8	43,3	43,8	43,9	45,2
Значення кута відкосу робочого борту кар'єру (β)	град.	16,4	16,3	16,2	16,1	16,1	15,7

При однакових обсягах виробництва металу, але різних параметрів робочих бортів, режими гірничих робіт також матимуть певні відмінності, які потребують подальшого дослідження

За умов збільшення бортового вмісту корисного компоненту та необхідності збереження постійної річної кількості металу у кінцевому продукті, розрахунок продуктивності кар'єру за параметрами видобутку руди й випуску концентрата виявляє тенденцію до зниження цих показників (табл. 1).

Оперуючи визначеними параметрами системи розробки та фіксованим напрямком поглиблення гірничих робіт, можна змодельовати положення гірничих робіт для кожного значення вмісту корисного компоненту. Як приклад, на рис. 2 показано конфігурацію гірничих робіт у момент досягнення поточної позначки дна кар'єру - 150 м, коли відкриті гірничі роботи виходять на кінцевий контур по верхніх горизонтах.

Для кожного із розглянутих варіантів розвитку гірничих робіт, що відповідають різним параметрам мінімального вмісту корисного компоненту та кутам відкосу робочого борта кар'єру, формується таблиця кумулятивних обсягів корисної копалини, розкривних порід і гірничої маси.

На основі отриманих кумулятивних даних для кожної пари таблиць будується кумулятивна функція $V=f(P)$, яка характеризує режим гірничих робіт за заданих умов.

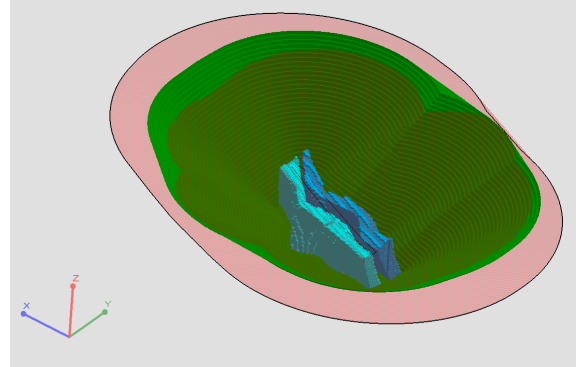


Рис. 2. Положення гірничих робіт в кар'єрі для $\varphi=\varphi_{\max}$ при виході верхніх горизонтів на кінцевий контур

Розрахувавши значення кумулятивних об'ємів для різних значень мінімального динамічного вмісту корисного компоненту при відповідних значеннях кутів відкосу робочого борта кар'єру, побудуємо сімейство кривих, що ілюструватимуть можливі варіанти режимів гірничих робіт (рис. 3).

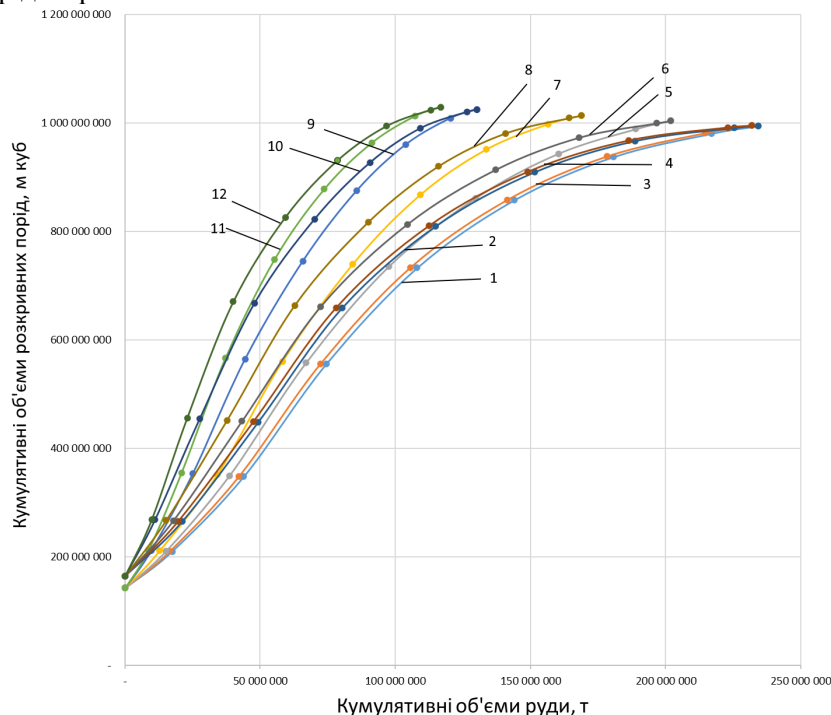


Рис. 3. Графіки режиму гірничих робіт для різних динамічних мінімальних вмістів корисного компоненту при $\varphi= \varphi_{\max}$ і $\varphi= \varphi_0$ відповідно: 1, 2 – 10%; 3, 4 – 12%; 5, 6 – 14%; 7, 8 – 16%; 9, 10 – 18%; 11, 12 – 20%.

Область оптимізації режиму гірничих робіт для кожного значення динамічного мінімального вмісту корисного компоненту обмежена парами кривих, отриманих на графіку. Подальші правила побудови усереднюючої прямої не будуть принципово відрізнятися від відомих методик роботи з графіками режиму гірничих робіт.

Висновки.

Таким чином, проведений аналіз останніх наукових досліджень дозволив визначити теоретичні основи і математичні методи управління режимом гірничих робіт при змінній кон'юнктурі на ринку продукції гірничо-видобувних підприємств. В якості інструменту параметричної адаптації виробничої системи кар'єру пропонується використовувати динамічний мінімальний вміст корисного компоненту. В подальшому були виконані аналітичні розрахунки параметрів елементів системи розробки – ширини площадки і довжини фронту гірничих робіт. На їх основі проведено моделювання варіантів розвитку гірничих робіт для різних значень динамічного мінімального вмісту корисного компоненту і побудоване сімейство кумулятивних кривих режиму гірничих робіт, на основі якого пропонується встановлювати календарний план гірничих робіт в умовах змінного середовища господарювання.

В подальших дослідженнях планується розробка методики визначення календарного плану при змінних значеннях динамічного мінімального вмісту корисного компоненту, а також її автоматизація.

Список літератури

1. Taylor H. K. General background the ore of cut-off grades / H. K. Taylor // Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A. – 1972. – Vol. 81. – P. 160–179.
2. Lane K. F. The Economic Definition of Ore: Cut-off Grades in Theory and Practice / K. F. Lane. – London : Mining Journal Books Ltd., 1988. – 205 p.
3. Cairns R. D., Shinkuma T. The choice of the cut-off grade in mining / R. D. Cairns, T. Shinkuma // Resources Policy. – 2003. – Vol. 29, No. 2. – P. 75–81.
4. Ataei M., Osanloo M. Determination of optimum cut-off grades of multiple metal deposits by using the Golden Section search method / M. Ataei, M. Osanloo // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2003. – Vol. 103, No. 8. – P. 493–499.
5. Ataei M., Osanloo M. Methods for calculation of optimal cut-off grades in complex ore deposits / M. Ataei, M. Osanloo // Journal of Mining Science. – 2003. – Vol. 39, No. 5. – P. 499–507.
6. Asad M. W. A. Cut off grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals / M. W. A. Asad // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 2005. – Vol. 19, No. 3. – P. 176–187.
7. Cetin E., Dowd P. A. Multi-mineral cut-off grade optimization by grid search / E. Cetin, P. A. Dowd // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2013. – Vol. 113, No. 8. – P. 659–665.
8. Nieto A., Zhang K. Y. Cut-off grade economic strategy for by-product mineral commodity operation: rare earth case study / A. Nieto, K. Y. Zhang // Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Mining Technology. – 2013. – Vol. 122, No. 3. – P. 166–171.
9. Dowd P. A. Application of dynamic and stochastic programming to optimise cut-off grades in mining operations / P. A. Dowd // Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A. – 1976. – Vol. 85. – P. 22–31.
10. Krautkraemer J. A. The cut-off grade and the theory of extraction / J. A. Krautkraemer // Canadian Journal of Economics. – 1988. – Vol. 21, No. 1. – P. 146–160.
11. Mardones J. L. Option valuation of real assets: application to a copper mine with operating flexibility / J. L. Mardones // Resources Policy. – 1993. – Vol. 19, No. 1. – P. 51–65.
12. Johnson P. V., Evatt G. W., Duck P. W., Howell S. D. The determination of a dynamic cut-off grade for the mining industry / P. V. Johnson, G. W. Evatt, P. W. Duck, S. D. Howell // Electrical Engineering and Applied Computing, Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 90. – P. 391–403.
13. Asad M. W. A., Dimitrakopoulos R. A heuristic approach to stochastic cut-off grade optimization for open pit mining complexes with multiple processing streams / M. W. A. Asad, R. Dimitrakopoulos // Resources Policy. – 2013. – Vol. 38, No. 4. – P. 591–597.
14. Azimi Y., Osanloo M., Esfahanipour A. An uncertainty based multi-criteria ranking system for open pit mining cut-off grade strategy selection / Y. Azimi, M. Osanloo, A. Esfahanipour // Resources Policy. – 2013. – Vol. 38, No. 2. – P. 212–223. – DOI: 10.1016/j.resourpol.2013.01.004.
15. Dagdelen K., Kawahata K. Application of mixed integer linear programming in open pit mine planning / K. Dagdelen, K. Kawahata // Mining Technology. – 2007. – Vol. 116, No. 1. – P. 1–10.
16. Ganguli R., Dagdelen K., Grygiel E. Mine scheduling and cut-off grade optimization using

mixed integer linear programming / R. Ganguli, K. Dagdelen, E. Grygiel // In: Darling P. (Ed.) SME Mining Engineering Handbook. 3rd ed. – Littleton, Colorado : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011. – P. 850–852.

17. Moosavi E., Gholamnejad J., Ataee-pour M., Khorram E. Optimal extraction sequence modelling for open pit operation considering dynamic cut-off grade / E. Moosavi, J. Gholamnejad, M. Ataee-pour, E. Khorram // *Mineral Resources Management*. – 2014. – Vol. 30, No. 2. – P. 173–186.

18. Lutsenko S., Zhukov S., Hryhoriev Y., Titov D. Dynamic factors of formation of mining development strategy in the conditions of incomplete certainty of the raw material market // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. – 2024. – Vol. 1319, No. 1. – P. 012006–012006. DOI: 10.1088/1755-1315/1319/1/012006.

19. Григор'єв Ю.І., Луценко С.О., Григор'єв І.Є., Швець Є.М., Куроп'ятник І.П. Динамічне проектування техніко-економічних показників відкритих гірничих робіт за допомогою нейромережових технологій // *Збірник наукових праць національного гірничого університету*. – 2024. – Вип. 76. – С. 33–41. DOI: 10.33271/crpnmu/76.033.

References

1. Taylor, H. K. (1972). General background the ore of cut-off grades // *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A*. Vol. 81, 160–179.

2. Lane, K. F. (1988). *The Economic Definition of Ore: Cut-off Grades in Theory and Practice*. London : Mining Journal Books Ltd..

3. Cairns, R. D., Shinkuma, T. (2003). The choice of the cut-off grade in mining. *Resources Policy*, 29, 2, 75–81.

4. Ataei M., Osanloo, M. (2003). Determination of optimum cut-off grades of multiple metal deposits by using the Golden Section search method. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 103, 8, 493–499.

5. Ataei, M., Osanloo, M. (2003). Methods for calculation of optimal cut-off grades in complex ore deposits. *Journal of Mining Science*, 39, 5, 499–507.

6. Asad, M. W. A. (2005). Cut off grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 19, 3, 176–187.

7. Cetin, E., Dowd, P. A. (2013). Multi-mineral cut-off grade optimization by grid search. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113, 8, 659–665.

8. Nieto, A., Zhang, K. Y. (2013). Cut-off grade economic strategy for by-product mineral

commodity operation: rare earth case study. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Mining Technology*, 122, 3, 166–171.

9. Dowd, P. A. (1976). Application of dynamic and stochastic programming to optimise cut-off grades in mining operations. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A*, 85, 22–31.

10. Krautkraemer, J. A. (1988). The cut-off grade and the theory of extraction. *Canadian Journal of Economics*, 21, 1, 146–160.

11. Mardones, J.L. (1993). Option valuation of real assets: application to a copper mine with operating flexibility. *Resources Policy*, 19, 1, 51–65.

12. Johnson, P. V., Evatt, G. W., Duck, P. W., Howell, S. D. (2011). The determination of a dynamic cut-off grade for the mining industry. *Electrical Engineering and Applied Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 90, 391–403.

13. Asad, M. W. A., Dimitrakopoulos, R. (2013). A heuristic approach to stochastic cut-off grade optimization for open pit mining complexes with multiple processing streams. *Resources Policy*, 38, 4, 591–597.

14. Azimi, Y., Osanloo, M., Esfahanipour, A. (2013). An uncertainty based multi-criteria ranking system for open pit mining cut-off grade strategy selection. *Resources Policy*, 38, 2, 212–223.

15. Dagdelen, K., Kawahata, K. (2007). Application of mixed integer linear programming in open pit mine planning. *Mining Technology*, 116, 1, 1–10.

16. Ganguli, R., Dagdelen, K., Grygiel, E. (2011). Mine scheduling and cut-off grade optimization using mixed integer linear programming. *Mining Engineering Handbook*. 3rd ed. – Littleton, Colorado : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 850–852.

17. Moosavi, E., Gholamnejad, J., Ataee-pour, M., Khorram, E. (2014). Optimal extraction sequence modelling for open pit operation considering dynamic cut-off grade. *Mineral Resources Management*, 30, 2, 173–186.

18. Lutsenko, S., Zhukov, S., Hryhoriev, Y., Titov, D. (2024). Dynamic factors of formation of mining development strategy in the conditions of incomplete certainty of the raw material market. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1319, 1. 012006–012006.

19. Hryhoriev, Yu.I., Lutsenko, S.O., Hryhoriev, I.Ie., Shvets, Ye.M., Kuropiatnyk, I.P. (2024). Dynamichne projektuvannia tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv vidkrytykh hirnychykh robit za dopomohoiu neiromerezhevykh tekhnolohii // *Zbirnyk naukovykh prats natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 76, 33–41. [in Ukrainian].

Григор'єв Юліан Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна

E-mail: yulian.hryhoriev@knu.edu.ua

Монастирський Юрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна

monastyrskiy@knu.edu.ua

Плотніков Олександр Володимирович – доктор геологічних наук, професор, професор кафедри геології та екології, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна

magnetit@meta.ua

Богомаз Ольга Петрівна – PhD, доцент, доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна

olha.bohomaz@mipolytech.education

STUDY OF INTERRELATIONSHIPS BETWEEN MINING SCHEDULE PARAMETERS, DEPOSIT CONFIGURATION AND DEVELOPMENT SYSTEM PARAMETERS UNDER VARIABLE PRICES OF THE MINING CLUSTER PRODUCTS

Purpose. The study investigates the impact of the dynamic minimum cutoff grade on the parameters of the open-pit development system for steeply dipping deposits and the optimization of mining schedules under variable market conditions for iron ore products.

Methods. The study uses methods of engineering analysis, synthesis, and generalization of information from various literary sources, along with multi-scenario modeling of the mining-geometrical parameters of the deposit.

Findings. The analysis of scientific research allowed to formulate theoretical principles and mathematical approaches to the management of the mining operations schedule in the context of dynamic changes in market conditions for the products of mining enterprises. To ensure flexible adaptation of the open-pit production system, it is proposed to apply a dynamic minimum content of the useful component. An analytical justification of the key parameters of the development system - the width of the working platform and the length of the ore front - was performed. Calculations have shown that with the increase in the dynamic minimum content of the useful component, the width of the working area increases, and the length of the ore front decreases due to the reclassification of part of the ore ledges as opencast. Variants of the mining operation schedule depending on the values of the dynamic minimum content of the useful component are modeled. The results obtained can be used to develop a calendar plan for mining operations in changing environmental conditions.

Originality. The concept of dynamic minimum content of useful component is proposed as an adaptive tool for operational management of mining operations in conditions of variable market factors. The dependence of the width of the working platform on the interaction between the qualitative indicators of the ore and the angle of slope of the working side is substantiated.

Practical implication. The developed approaches allow to increase the flexibility of the open-pit production system, reduce the costs of forming working areas, and improve the economic efficiency of the open-pit operation in the conditions of changing conditions of the iron ore market.

Keywords: dynamic minimum cutoff grade, dynamic external environmental conditions, mining schedule parameters, working bench width, bench slope angle, mining front.

Hryhoriev Yulian – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Open-Pit Mining, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

E-mail: yulian.hryhoriev@knu.edu.ua

Monastyrskiy Yurii - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Road Transport, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

E-mail: monastyrskiy@knu.edu.ua

Plotnikov Oleksandr – Doctor of Geological Sciences, Professor, Professor of the Department of Geology and Ecology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

E-mail: magnetit@meta.ua

Bohomaz Olha – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Labor Safety and Environmental Protection, Technical University “Metinvest Polytechnic” LLC, Zaporizhzhia, Ukraine

E-mail: olha.bohomaz@mipolytech.education