

## Обґрунтування методики адаптивного формування календарного плану гірничих робіт з урахуванням змінної якості рудної сировини та динаміки ринкової кон'юнктури

*Одним з найбільш актуальних завдань сучасного гірничого виробництва є забезпечення стійкості та адаптивності режиму гірничих робіт у стохастичних умовах господарювання. У роботі обґрунтовано підхід до побудови календарного плану на основі оптимізації положення усереднюючої прямої режиму гірничих робіт у тривимірному просторі координат гірничої маси, мінімального вмісту корисного компонента та обсягу руди. Метою дослідження є розробка методики адаптивного формування календарного плану гірничих робіт з урахуванням динаміки ціни на продукцію гірничодобувного підприємства, а також змінної якості рудної сировини. Методологічну основу становить оптимізація положень усереднюючої прямої графіку режиму гірничих робіт, інтерполяція тривимірних обмежувальних поверхонь, попередньо реалізованих графо-аналітичним способом. Програмна реалізація алгоритму здійснена на мові програмування Python у середовищі Google Colaboratory із застосуванням бібліотек SciPy і Plotly для оптимізації та візуалізації результатів відповідно. Запропонований підхід дозволяє не лише забезпечити погодженість обсягів робіт із обмеженнями законів розвитку робочої зони кар'єру, а й мінімізувати витрати на розкриття у змінних ринкових умовах. Результати дослідження мають наукову цінність для подальшого розвитку методів динамічного проектування відкритої розробки родовищ корисних копалин. Практична значущість результатів досліджень полягає у можливості використання запропонованої методики для оптимізації режиму гірничих робіт гірничодобувних підприємств у стохастичному економічному середовищі.*

**Ключові слова:** динамічне проектування; режим гірничих робіт; календарне планування; динамічний бортовий вміст корисного компонента; адаптивне управління.

**Актуальність теми** дослідження зумовлена зростаючою складністю управління гірничодобувними процесами в умовах високої волатильності світових ринків мінеральної сировини та необхідністю забезпечення стійкості функціонування гірничодобувних підприємств. Одним із ключових викликів сучасного гірничого проектування є розробка таких підходів до формування календарного плану гірничих робіт, які дозволяють не лише враховувати поточні техніко-економічні умови, а й оперативно адаптуватися до зміни ринкової кон'юнктури без суттєвого порушення обраного режиму гірничих робіт.

Зміна ринкової ціни на продукцію безпосередньо впливає на економічну доцільність розробки окремих ділянок, особливо у випадках, коли поклади характеризуються варіабельністю вмісту корисного компонента. У таких умовах класичні методики планування, що базуються на незмінних параметрах видобутку, втрачають ефективність. Це обумовлює необхідність побудови гнучких, сценарно-чутливих календарних планів, які враховують не лише морфологію покладу та технічні обмеження, а й можливість оперативного перегляду меж рентабельності, динамічного мінімального вмісту та співвідношення між розкриттям і видобутком.

Особливої важливості набуває створення моделей, що поєднують геометричні характеристики родовища, параметри технологічної системи розробки та економічні чинники в єдиному просторі оптимізації. Формування таких моделей дозволяє не лише синтезувати календарний план гірничих робіт, а й прогнозувати його стійкість до можливих коливань зовнішніх умов [1, 2], зокрема, вартості металу, транспортних витрат чи енергетичних ресурсів. У цьому контексті підвищується значення підходів, орієнтованих на створення множини допустимих рішень, серед яких можливо оперативно обирати найбільш ефективні відповідно до поточних економічних умов. Це зумовлює потребу переходу від детерміністичного до стохастичного планування гірничих робіт.

Таким чином, розробка методики визначення календарного плану гірничих робіт із урахуванням якості руди та цінової динаміки є не лише актуальною, а й стратегічно необхідною умовою підвищення ефективності функціонування гірничодобувних підприємств в умовах реалій сучасного ринку мінеральної продукції.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор.** У сучасній науковій літературі значна увага приділяється адаптивному плануванню гірничих робіт в умовах економічної невизначеності. Зокрема, дослідження А.Башетіна [3] підкреслює важливість оптимізації мінімального вмісту корисного компонента як стратегічного інструменту для підвищення прибутковості та продовження терміну експлуатації родовищ. Автор зазначає, що дана оптимізація є не лише

математичним завданням, а й ключовим елементом стратегічного управління в гірничодобувній промисловості. У дослідженні М.Джонсона та М.Еватта [4] розглядається динамічне визначення мінімального вмісту корисного компонента, що враховує не лише поточну ціну на продукцію, але й прогнозовані зміни вмісту корисного компонента в наступних блоках, витрати на переробку та обмеження на темпи видобутку. Такий підхід дозволяє більш точно визначати, які частини родовища слід розглядати як руду, а які – як розкривні породи, з урахуванням прогнозованих економічних умов. У роботі Х.Шави та К.Мусінгвіні [5] представлено стохастичну модель оптимізації граничного вмісту корисного компонента, що розширює детерміністичну теорію К.Лейна [6]. Модель враховує невизначеність у параметрах, таких як ціна на продукцію та розподіл вмісту корисного компонента, що дозволяє більш точно оцінювати економічну доцільність видобутку в умовах мінливого ринку.

Особливе значення мають роботи Р.Дімітракопулоса [7], в яких обґрунтовано методологію стохастичного планування гірничих робіт на основі геостатистичних прогнозів. Автор доводить доцільність впровадження ймовірнісного підходу при довгостроковому плануванні кар'єрів, що дає змогу врахувати розсіювання якості руди і забезпечити стабільність рудопотоку.

Водночас актуальними залишаються дослідження, присвячені багатокритеріальній оптимізації. Наприклад, Е.Топал і С.Рамазан [8] запропонували нову модель змішаного цілочисельного програмування для розкладу техніки, що дозволяє враховувати витрати на обслуговування в межах стратегічного плану. У роботах Х.Аскарі-Насаба та Я.Пуррахіміана [9] розглянуто формальні математичні моделі для виробничого планування у відкритих розробках. Зокрема, вони вводять обмеження на зміну якості рудопотоку між періодами, що наближає модель до реальних умов функціонування гірничо-збагачувального комплексу.

У статті [10] проведено дослідження взаємозв'язку ключових параметрів елементів системи відкритої розробки, зокрема ширини робочої площадки та довжини фронту гірничих робіт в умовах зміни ціни на продукцію гірничодобувних підприємств. Ці параметри стали основою для побудови моделей розвитку гірничих робіт, що враховують варіативність мінімального вмісту корисного компонента в умовах його динамічної зміни. У результаті моделювання було сформовано множину кумулятивних кривих, які відображають області варіювання режиму ведення гірничих робіт. Запропоновано використовувати цю множину як інструмент для формування календарного плану гірничих робіт з урахуванням нестабільності зовнішнього економічного середовища та необхідності адаптації технологічних рішень до змін кон'юнктури ринку. Однак побудова в окресленій області усереднюючих прямих, які б описували динаміку обсягів виймання розкривних порід і виймання руди різної якості, пов'язана із рядом методологічних особливостей і потребою вирішення ряду математичних задач.

**Метою статті** є розробка методики визначення календарного плану гірничих робіт в кар'єрі при змінній ціні на продукцію гірничодобувного підприємства і динамічному мінімальному вмісту корисного компонента.

**Викладення основного матеріалу.** Моделювання режиму гірничих робіт деякого умовного родовища (рис. 1) в умовах динамічного мінімального вмісту корисного компонента дозволило, перше, встановити взаємозв'язок між ним, шириною робочої площадки, довжиною фронту гірничих робіт і запасами родовища. По-друге, в результаті моделювання варіантів режиму гірничих робіт було отримано область його можливої оптимізації. Вона окреслюється положенням кумулятивних кривих для мінімального і максимального кута відкосу робочого борта кар'єру при різних значеннях вмісту корисного компонента. Дана область оптимізації може бути візуалізована у вигляді сімейства кривих (рис. 2).

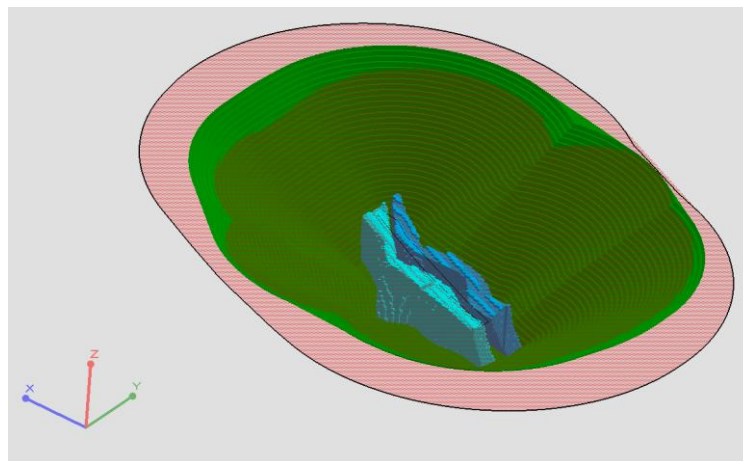


Рис. 1. Моделювання режиму гірничих робіт умовного родовища з урахуванням якості рудної маси

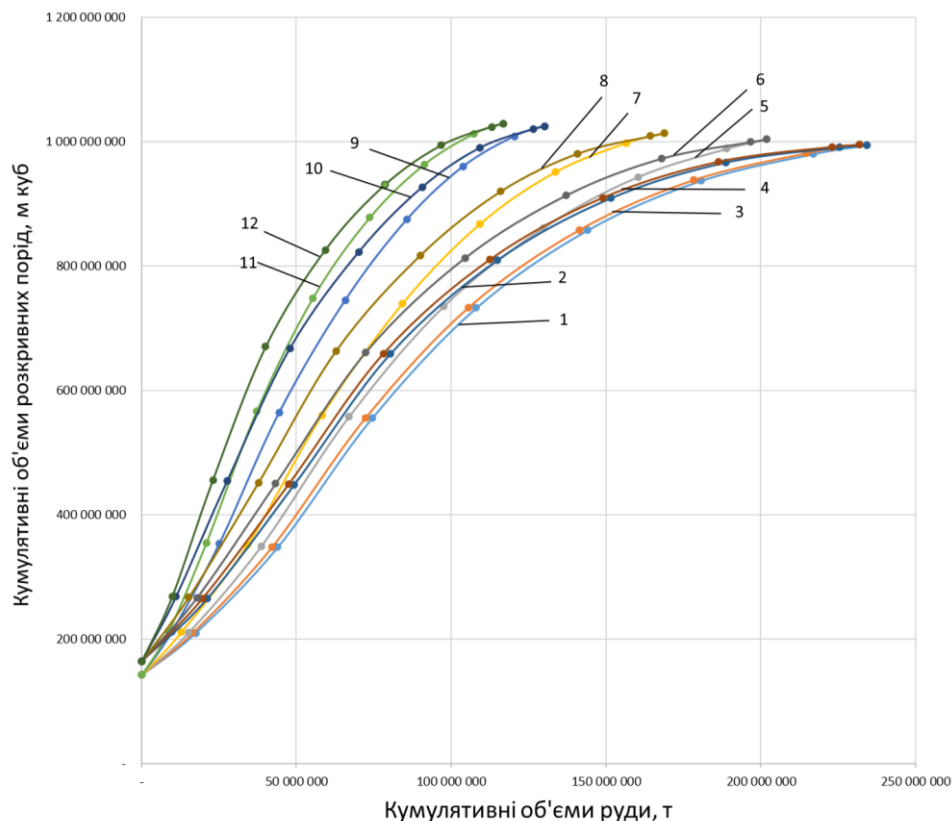


Рис. 2. Сімейство кривих, що описують графіки режиму гірничих робіт для різних значень динамічних мінімальних вмістів корисного компонента: 1, 3, 5, 7, 9, 11 – криві для кута відкосу робочого борта кар'єру  $\varphi = \varphi_{\max}$  і вмістів корисного компонента 10–20 %; 2, 4, 6, 8, 10, 12 – криві для кута відкосу робочого борта кар'єру  $\varphi = \varphi_0$  і вмістів корисного компонента 10–20 %

Фактично простір між парами кривих (1, 3, 5, 7, 9, 11) та (2, 4, 6, 8, 10, 12) на представленому графіку відображає область допустимих режимів ведення гірничих робіт за умов варіювання мінімального вмісту корисного компонента ( $\tau$ ), тобто є областю роботи кар'єру з усіма допустимими значеннями кута відкосу робочого борта кар'єру.

У разі застосування постійного кута укосу робочого борту кар'єру ( $\varphi$ ) параметри режиму не залишаються стабільними, оскільки поточний коефіцієнт розкриття змінюється залежно від глибини, морфології покладу та обраної послідовності відпрацювання. Зокрема, при зміні бортового вмісту корисного компонента  $\tau$  внаслідок динаміки ринку змінюється і конфігурація гірничих робіт, що впливає на сумарні обсяги гірничої маси. Такі коливання призводять до нерівномірності у режимі гірничих робіт, що своєю чергою обумовлює низку негативних техніко-економічних наслідків:

1. Флуктуація потреби в гірничо-транспортному обладнанні, що ускладнює планування експлуатації машин і механізмів;
2. Нестабільне споживання енергоносіїв, матеріалів і комплектуючих, що ускладнює логістику постачання та знижує ефективність складування;
3. Коливання потреби у трудових ресурсах, що унеможливує оптимальне кадрове забезпечення;
4. Нерівномірний знос основних фондів, що погіршує якість експлуатації та планового ремонту обладнання;
5. Порушення ритмічності гірничих робіт, що негативно впливає на організаційно-технологічну стійкість виробництва.

З огляду на зазначене вище, виникає необхідність в усередненні режиму гірничих робіт шляхом побудови такої траєкторії у просторі, яка забезпечувала б допустиме навантаження на виробничу систему в умовах варіативного бортового вмісту. Формування узагальненої усереднюючої прямої в межах області допустимих варіантів дозволяє мінімізувати коливання у використанні ресурсів і забезпечити економічно обґрунтований, технологічно стабільний план розвитку гірничих робіт.

Однак безпосереднє використання цього графіка за аналогією з класичною схемою, де наведено лише дві обмежувальні криві лінії, відповідні кутам борта  $\varphi = \varphi_{\max}$  та  $\varphi = \varphi_0$ , є методологічно некоректним. Це пов'язано з тим, що криві, побудовані для різних значень  $\tau$ , накладаються одна на одну,

утворюючи багатозначну проекцію у двовимірному просторі. У такому випадку положення усереднюючої (планової) лінії стає невизначеним щодо параметра якості руди, адже однакові значення обсягів руди та гірничої маси можуть відповідати різним значенням вмісту корисного компонента.

Для подолання цієї неоднозначності доцільно ввести додаткову вісь  $\tau$  (динамічного мінімального вмісту) та розглянути сімейство кривих режиму гірничих робіт у тривимірному просторі ( $GM, P, \tau$ ). Така постановка дозволяє однозначно співвіднести кожен точку у просторі з конкретним технологічним сценарієм, а також визначити положення усереднюючої ламаної як просторової прямої, що забезпечує найкраще узгодження із заданими критеріями (наприклад, мінімізацією сумарних витрат або забезпеченням стабільного вмісту корисного компонента у шихті).

Відповідне тривимірне представлення області оптимізації режиму гірничих робіт наведено на рисунку 3, де кожна пара кривих відповідає конкретному значенню  $\tau$ , сукупність кривих по максимальних значеннях кута є основою для інтерполяції нижньої площини, а при мінімальних кутах – верхньої площини. Це дає змогу здійснити побудову усереднюючої лінії у межах заданих геометричних і технологічних обмежень.

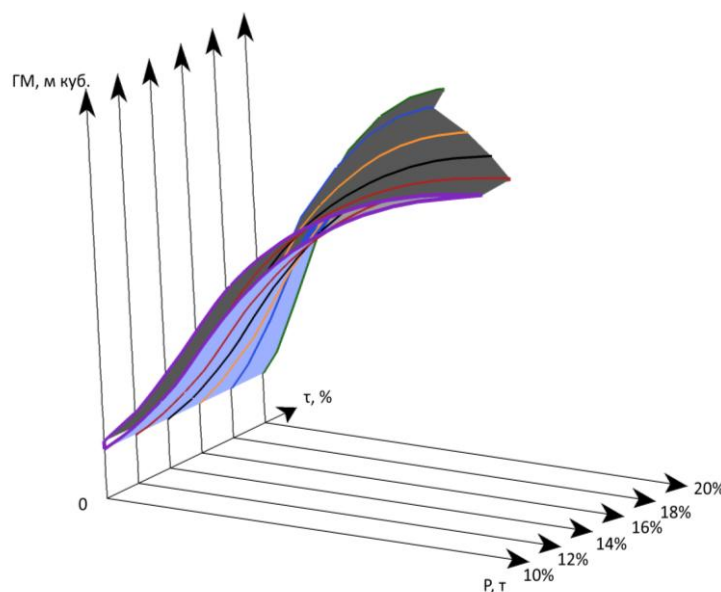


Рис. 3. Тривимірне представлення області оптимізації режиму гірничих робіт у координатах гірнична маса – бортовий вміст – об'єм руди:  $GM = f(\tau, P)$

На основі побудованого тривимірного графіка  $GM = f(\tau, P)$  правила побудови усереднюючої ламаної режиму гірничих робіт можуть бути сформульовані у вигляді таких графо-аналітичних вимог:

1. Усереднююча лінія повинна бути прямолінійною. Це забезпечує стабільність прогнозування коефіцієнта розкриття і, відповідно, режиму гірничих робіт на всьому періоді усереднення;

2. Пряма усереднення повинна проходити у межах допустимого простору, обмеженого зверху та знизу поверхнями, утвореними сімейством кривих при граничних значеннях кута укосу робочого борту кар'єру  $\varphi = \varphi_{\max}$  та  $\varphi = \varphi_0$  для кожного рівня мінімального вмісту корисного компонента  $\tau$ . Таким чином, область, у межах якої допускається побудова усереднюючої прямої, має тривимірне обмеження у просторі ( $GM, P, \tau$ ), де кожна вертикальна площина характеризує сценарій розвитку гірничих робіт зі сталим бортовим вмістом;

3. Положення усереднюючої прямої повинно бути якомога ближчим до нижньої межі простору оптимізації, тобто до поверхні, що відповідає умовно мінімальному обсягу гірничої маси. Це дозволяє мінімізувати сумарні витрати на переміщення породи, забезпечити економічну ефективність розробки та підвищити стійкість до несприятливих зовнішніх впливів.

На початку усереднюючої прямої, що відповідає першому періоду експлуатації кар'єру, ця лінія відсікає на осі  $GM$  відрізок, який кількісно відповідає обсягу гірничо-капітальних робіт. Для визначення тривалості періоду усереднення на осі обсягів руди  $P$  необхідно накласти відповідну шкалу часу  $T$ , що дозволить співвіднести обсяг руди з календарною тривалістю етапу розробки;

4. Мінімальна тривалість періоду усереднення має відповідати строку окупності основних фондів, що в умовах гірничодобувного виробництва, як правило, становить не менше 7–8 років. Така тривалість дозволяє забезпечити не лише техніко-економічну доцільність, але й інвестиційну привабливість розробки.

Слід зазначити, що на відміну від класичних графіків виду  $V = f(P)$ , де тангенс кута нахилу усереднюючої прямої інтерпретується як коефіцієнт розкриття, у запропонованій моделі, де змінною є не

лише об'єм руди, а й бортовий вміст, а по вертикальній осі відкладається гірнича маса, похідна усереднюючої лінії відповідає коефіцієнту видобутку, що відображає загальний обсяг гірничої маси на одиницю руди.

Попри те, що базові принципи усереднення залишаються незмінними, графічна реалізація цього підходу в умовах тривимірного простору ускладнюється, і може супроводжуватися певною похибкою при візуальному узгодженні положень усереднюючої прямої. З огляду на це доцільно перейти до аналітичного розв'язання задачі з формалізацією відповідних залежностей та обмежень.

Використання сучасного математичного апарату та програмного забезпечення дозволяє не лише точно визначити положення усереднюючої прямої в просторі, але й асоціювати кожну точку на поверхні  $\varphi = \varphi_0$  і  $\varphi = \varphi_{\max}$  із конкретними економічними характеристиками – витратами на видобуток, транспортування, збагачення руди та виймання розкриття. Такий підхід відкриває можливості для формування адаптивних, техніко-економічно обґрунтованих режимів гірничих робіт у реальному виробничому середовищі.

Формалізуємо задачу аналітичної побудови усереднюючої прямої: нам необхідно побудувати пряму, яка проходить через задані нами точки  $(P_i, \tau_i)$ , при цьому значення  $ГМ$  повинні знаходитися між  $ГМ_{\max}(P, \tau)$  і  $ГМ_0(P, \tau)$  на інтервалі для  $P$ , який ми обираємо самі.

Усереднюючу пряму можна описати рівнянням (1):

$$ГМ = k_1 P + k_2 \tau + b, \quad (1)$$

де  $P$  – об'єм руди,  $\tau$  – динамічний мінімальний вміст корисного компоненту;  $ГМ$  – об'єм гірської маси;  $k_1, k_2$  – нахили прямої по осях  $P$  та  $\tau$ ;  $b$  – зміщення.

Для того, щоб знайти оптимальні параметри  $k_1, k_2$  і  $b$ , необхідно мінімізувати середньоквадратичне відхилення СКВ між значеннями  $ГМ_i$  і прогнозованими значеннями на прямій  $k_1 P + k_2 \tau + b$ . Функція для мінімізації буде виглядати таким чином (2):

$$СКВ = \sum_{i=1}^n (ГМ_i - (k_1 P_i + k_2 \tau + b))^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $n$  – це кількість точок.

Значення  $ГМ$  повинні знаходитися в межах, що задані умовою (3):

$$ГМ_{\max}(P, \tau) \leq ГМ \leq ГМ_0(P, \tau). \quad (3)$$

Графічна інтерпретація кумулятивного режиму гірничих робіт у вигляді двох поверхонь для граничних значень кута укосу робочого борту кар'єру ( $\varphi = \varphi_{\max}$  та  $\varphi = \varphi_0$ ) з урахуванням змінного динамічного бортового вмісту є досить громіздкою та малопридатною для практичного застосування. З огляду на це, відповідна задача була реалізована засобами мови програмування Python у середовищі Google Colaboratory.

Розроблений алгоритм автоматизує перехід від геометричної моделі режиму гірничих робіт до календарного плану шляхом інтеграції процедур візуалізації та оптимізації. На початковому етапі завантажуються вхідні дані, що представляють координати точок на поверхнях, утворених сімействами кривих для різних значень  $\varphi$  та  $\tau$ . Далі за допомогою методу поверхневої інтерполяції *griddata* формуються дві обмежувальні поверхні – верхня ( $\varphi = \varphi_0$ ) та нижня ( $\varphi = \varphi_{\max}$ ), які задають межі допустимого простору для побудови усереднюючих прямих. На наступному етапі виконується власне побудова усереднюючих прямих, що задаються набором контрольних точок. Їх положення визначається з урахуванням заданого періоду усереднення, тривалість якого має відповідати строку окупності основних фондів, а також прогнозного значення динамічного бортового вмісту, що формується на основі зовнішньої цінової кон'юнктури. Оскільки прогнозування ціни на кінцеву продукцію не є предметом цього дослідження, відповідні значення  $\tau$  вводяться як вхідні параметри.

Кожен сегмент усереднюючої прямої оптимізується окремо із застосуванням методу *minimize* з бібліотеки *SciPy*, з урахуванням обмежень, заданих верхньою та нижньою поверхнями області допустимих рішень. Метою оптимізації є пошук таких координат точок, що забезпечують мінімальне відхилення від нижньої межі ( $\varphi = \varphi_{\max}$ ) і водночас мінімізують площу трапеції між усереднюючою прямою та віссю  $P$  як аналог інтеграла по цій ділянці прямої. Це дозволяє досягти не лише геометричної, а й економічної ефективності, оскільки мінімізація площі інтерпретується як зменшення обсягів гірничої маси в межах заданого періоду. Аналітично пряма визначається рівнянням (1), а сама оптимізація зводиться до мінімізації значення функції, що описує площу між проекцією цієї прямої на площину  $(ГМ, P)$  та нижньою граничною кривою. В розрахунках використовується алгоритм послідовного квадратичного програмування з обмеженнями (метод *SLSQP*), який ефективно реалізовано в *scipy.optimize.minimize*.

Кожна ділянка між парою контрольних точок оптимізується окремо, із забезпеченням дотримання допустимого діапазону значень  $ГМ$  на відповідному інтервалі  $P$ . Після завершення обчислень результати візуалізуються у тривимірному просторі за допомогою бібліотеки *Plotly*, яка дозволяє відображати як самі обмежувальні поверхні, так і побудовану усереднюючу лінію (рис. 4).

Календарний план гірничих робіт

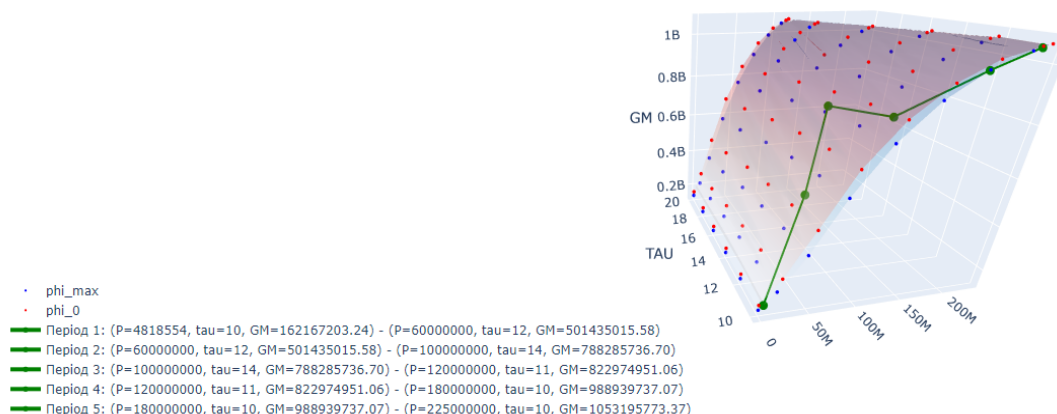


Рис. 4. Тривимірна візуалізація графіку режиму гірничих робіт у середовищі Google Colaboratory за розробленим алгоритмом

Така візуалізація надає змогу здійснити наочну оцінку календарного плану гірничих робіт та узгодженості усереднення з геометричними і технологічними обмеженнями. Візуалізація побудови усереднюючої лінії не бере участі в процесі оптимізації, але дає змогу краще уявити динаміку видобутку руд різної якості і вимання відповідних їм обсягів розкривних порід.

Для формування календарного плану гірничих робіт визначаються обсяги видобутку руди та розкриву за кожним варіантом бортового вмісту на відповідні роки експлуатації. При цьому забезпечується умова рівності варіантів за річним обсягом металу у концентраті, яка досягається за рахунок залучення руди з відмінними якісними характеристиками та об'ємними показниками. Завершальна оцінка доцільності варіантів режиму гірничих робіт має здійснюватися на основі узагальненого економічного критерію ефективності.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Розроблена методика встановлення оптимального календарного плану гірничих робіт з урахуванням якості руди в умовах мінливості цін на продукцію гірничодобувного підприємства є важливим інструментом адаптивного управління параметрами кар'єру, що дає подальший розвиток концепції динамічного проектування відкритих гірничих робіт. Надалі в межах наукових досліджень планується вдосконалення цієї методики для її використання в межах регіонального гірничодобувного кластера, а також розвиток підходів до оцінки отриманих проектних рішень в умовах невизначеності.

#### Список використаної літератури:

1. Hryhoriev Y. Dominant determinants of adaptation of the mining complex in the conditions of a dynamic environment / Y.Hryhoriev, S.Lutsenko, S.Joukov // *Inżynieria Mineralna*. – 2023. – Vol. 1, № 1. – P. 15–21. DOI: 10.29227/im-2023-01-02.
2. Системні невідповідності за традиційного проектування залізрудних кар'єрів / С.О. Луценко, С.О. Жуков, Ю.І. Григор'єв, С.О. Федоренко // *Гірничий вісник*. – 2023. – № 111. – С. 11–18 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://iomining.in.ua/wp-content/uploads/GV/111/GM111.pdf>.
3. Bascetin A. Determination of optimal mining cut-off grades: mathematical formulation and solution algorithm / A.Bascetin, A.Nieto // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2019. – № 119 (10). – P. 839–846.
4. Johnson M. The determination of a dynamic cut-off grade for the mining industry / M.Johnson, M.Evatt. – Manchester : The University of Manchester, 2017 [Electronic resource]. – Access mode : [https://eprints.maths.manchester.ac.uk/1705/1/johnson\\_evatt\\_book\\_cutoff.pdf](https://eprints.maths.manchester.ac.uk/1705/1/johnson_evatt_book_cutoff.pdf).
5. Shava H. A stochastic cut-off grade optimization model to incorporate uncertainty in metal prices and ore grades / H.Shava, C.Musingwini // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2019. – Vol. 119, № 3 [Electronic resource]. – Access mode : [https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2225-62532019000300004](https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532019000300004).
6. 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.
7. Dimitrakopoulos R. Stochastic optimization for strategic mine planning: a decade of developments / R.Dimitrakopoulos // *Journal of Mining Science*. – 2011. – Vol. 47, № 2. – P. 138–150. DOI: 10.1134/S1062739147020018.
8. Topal E. A new MIP model for mine equipment scheduling by minimizing maintenance cost / E.Topal, S.Ramazani // *European Journal of Operational Research*. – 2010. – Vol. 207, № 2. – P. 1065–1071. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.05.037.



9. Mixed integer linear programming formulations for open pit production scheduling / H.Askari-Nasab, Y.Pourrahimian, E.Ben-Awuah, S.Kalantari // *Journal of Mining Science*. – 2011. – Vol. 47, № 3. – P. 338–359. DOI: 10.1134/s1062739147030117.
10. Дослідження взаємозв'язків параметрів режиму гірничих робіт, конфігурації покладу і параметрів системи розробки при змінній ціні на продукцію гірничодобувного кластеру / Ю.І. Григор'єв, Ю.А. Монастирський, О.В. Плотников, О.П. Богомаз // *Наукові праці ДонНТУ. Серія : Гірничо-геологічна*. – 2024. – № 1–2 (31–32). – С. 39–48. DOI: 10.31474/2073-9575-2024-1(31)-2(32)-39-48.

#### References:

1. Hryhoriev, Y., Lutsenko, S. and Joukov, S. (2023), «Dominant determinants of adaptation of the mining complex in the conditions of a dynamic environment», *Inżynieria Mineralna*, Vol. 1, No. 1, pp. 15–21, doi: 10.29227/im-2023-01-02.
2. Lutsenko, S.O., Zhukov, S.O., Hryhoriev, Yu.I. and Fedorenko, S.O. (2023), «Systemni nevidpovidnosti za tradytsiinoho proiektuvannia zalizorudnykh karieriv», *Hirnychi visnyk*, No. 111, pp. 11–18, [Online], available at: <https://iomining.in.ua/wp-content/uploads/GV/111/GM111.pdf>
3. Bascetin, A. and Nieto, A. (2019), «Determination of optimal mining cut-off grades: mathematical formulation and solution algorithm», *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, No. 119 (10), pp. 839–846.
4. Johnson, M. and Evatt, M. (2017), *The determination of a dynamic cut-off grade for the mining industry*, The University of Manchester, Manchester, [Online], available at: [https://eprints.maths.manchester.ac.uk/1705/1/johnson\\_evatt\\_book\\_cutoff.pdf](https://eprints.maths.manchester.ac.uk/1705/1/johnson_evatt_book_cutoff.pdf)
5. Shava, H. and Musingwini, C. (2019), «A stochastic cut-off grade optimization model to incorporate uncertainty in metal prices and ore grades», *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 119, No. 3, [Online], available at: [https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2225-62532019000300004](https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532019000300004)
6. Lane, K.F. (1988), *The economic definition of ore: cut-off grades in theory and practice*, Mining Journal Books Ltd, London, 205 p.
7. Dimitrakopoulos, R. (2011), «Stochastic optimization for strategic mine planning: a decade of developments», *Journal of Mining Science*, Vol. 47, No. 2, pp. 138–150, doi: 10.1134/S1062739147020018.
8. Topal, E. and Ramazan, S. (2010), «A new MIP model for mine equipment scheduling by minimizing maintenance cost», *European Journal of Operational Research*, Vol. 207, No. 2, pp. 1065–1071, doi: 10.1016/j.ejor.2010.05.037.
9. Askari-Nasab, H., Pourrahimian, Y., Ben-Awuah, E. and Kalantari, S. (2011), «Mixed integer linear programming formulations for open pit production scheduling», *Journal of Mining Science*, Vol. 47, No. 3, pp. 338–359, doi: 10.1134/s1062739147030117.
10. Hryhoriev, Yu.I., Monastyrskyi, Yu.A., Plotnikov, O.V. and Bohomaz, O.P. (2024), «Doslidzhennia vzaiemozviazkiv parametriv rezhymu hirnychych robit, konfihratsii pokladu i parametriv systemy rozrobky pry zmynnii tsini na produktsiiu hirnychodobuvnoho klasteru», *Naukovi pratsi DonNTU. Serii. Hirnycho-heolohichna*, No. 1–2 (31–32), pp. 39–48, doi: 10.31474/2073-9575-2024-1(31)-2(32)-39-48.

**Григор'єв Юліан Ігорович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт Криворізького національного університету.

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

Наукові інтереси:

- стратегічне проєктування відкритих гірничих робіт;
- формування і відпрацювання техногенних родовищ;
- автоматизація розрахунків процесів гірничого виробництва.

**Hryhoriev Y.I.**

#### **Substantiation of the methodology for adaptive formation of the mining work schedule taking into account the variable quality of ore raw materials and market dynamics**

One of the most urgent tasks of modern mining production is to ensure the stability and adaptability of the mining operation schedule in stochastic management conditions. The paper substantiates an approach to building a calendar plan based on optimizing the position of the averaging line of the mining operation schedule in the three-dimensional coordinate space of the mining mass, the cut-off grade of the useful component and the ore volume. The aim of the research is to develop a method for adaptive formation of the mining schedule taking into account the dynamics of the price of the mining enterprise's products, as well as the variable quality of ore raw materials. The methodological basis is the optimization of the provisions of the averaging straight line schedule of the mining schedule, the interpolation of three-dimensional limiting surfaces, previously implemented by the graph-analytical method. The algorithm is implemented in Python in the Google Colaboratory environment using the SciPy and Plotly libraries for optimization and visualization of results, respectively. The proposed approach allows us not only to ensure compliance of the scope of work with the limitations of the laws of development of the open-pit working area, but also to minimize the costs of opening in changing market conditions. The results of the study have scientific value for the further development of methods for dynamic design of open pit mining of mineral deposits. The practical significance of the research results lies in the possibility of using the proposed methodology to optimize the mining operations of mining enterprises in a stochastic economic environment.

**Keywords:** dynamic design; mining schedule; calendar planning; dynamic cut-off grade; adaptive control.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2025.