

**МОДЕЛЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ СТАНУ ЗАПАСІВ  
ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА**

А.О. Хорольський<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна

\*Відповідальний автор: e-mail: andreykh918@gmail.com

**A MODEL OF INVESTIGATION OF CHANGE OF INVENTORIES FOR  
OPTIMIZATION MULTI-PARAMETER PROCESSES OF MINING  
PRODUCTION**

A.A. Khorolskyi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail: andreykh918@gmail.com

**ABSTRACT**

**Purpose.** Develop a new approach to the design of processes that accompany the development of mineral deposits. This will allow considering the multiplicity and different degree of influence of the parameters on the overall efficiency.

**Methods.** A decomposition approach is applied to optimize multi-parameter processes of mining production. Network models and optimization algorithms on networks and graphs for finding the optimal strategy for the development of mineral deposits. A model of the study of changes in the state of reserves for the design of technological processes that accompany the extraction of minerals.

**Results.** The method of optimization of the parameters of the development of mineral deposits was proposed based on the presentation of alternative options of technological processes in the form of a network model. Depending on the type of mineral, as well as the expediency of mining waste enrichment, two design strategies are proposed. If it is advisable to enrich the waste, then it is necessary to maximize the value of a ton of rock mass. If it is impractical to enrich mining waste, it is necessary to minimize the costs of mining a ton of mineral. To increase the efficiency of exploitation of ore deposits of minerals, it is proposed to use mining waste as a component mixture for paving the produced space. The volume of work on the establishment of the developed space is determined on the basis of marginal analysis. In order to increase the efficiency of the operation of coal deposits, it is proposed to minimize the amount of waste that comes to the surface. Alternative options for the exploitation of the coal deposit were considered and two strategies were proposed: one consists in the minimization of waste,

which involves selective extraction and laying of the produced space, and the other strategy consists in the maximization of the extraction of associated minerals, which involves combine extraction, separation of cargo flows, additional enrichment of waste.

**Scientific novelty.** Scientific novelty consists in the development of a new approach, as well as in the creation of models for the development of mineral deposits. The algorithm for designing the process of development of mineral deposits is given. If it is impractical to enrich mining waste, then we apply the programming of the alternative graph to the minimum, which will minimize the cost of extracting 1 ton of useful mineral, in the other case, the programming of the alternative graph to the maximum, which will allow to maximize the cost of 1 ton of mining mass. Fulfillment of these conditions will increase the efficiency of production and reduce the man-made load on the environment.

**Practical implication.** It consists in the creation of a package of application programs for designing the processes of development of mineral deposits.

**Keywords:** strategy, production waste, design, ecology, technological scheme, graph, software.

## 1. ВСТУП

Незалежно від вектору розвитку економіки країни попит на корисні копалини буде зберігатись, проте в залежності від інноваційної складової буде різним. Для «сировинних» економік це вугілля, залізна руда, гірничохімічна сировина та будівельні матеріали, а для систем господарювання з високою доданою вартістю це – літій, золото, срібло, ртуть, кобальт, титан – всі ці корисні копалини є на території України, проте належного освоєння немає. Окрім цього, існує проблема накопичення відходів видобутку корисних копалин, які потенційно є техногенними родовищами корисних копалин. Тому, існує проблема належного освоєння – для цього слід запропонувати новітні підходи, щодо проектування. Вирішенню цієї проблеми присвячене дане дослідження.

Але, перш ніж перейти до викладення основного матеріалу, варто зосередитись на проблемах, які притаманні виключно процесам освоєння родовищ корисних копалин:

- проблема конфлікту між ліцензіаром та ліцензіатом; з одного боку є держава, яка надає право на користування надрами та зацікавлена не тільки в отриманні економічного ефекту, але і мінімізації техногенного навантаження на довкілля, створенні соціально-сприятливих умов для проживання на території, а з іншого боку є надрокористувач (згідно «Кодексу України про надра» користувачами надр (далі –надрокористувачами) можуть бути підприємства, установи, організації, громадяни України, а також іноземці та особи без громадянства, іноземні юридичні особи), який прагне отримати максимальний економічний ефект від процесу освоєння при менших капітальних витратах;

- багатоманіття факторів за природою та ступенем важливості, які здійснюють вплив на загальну ефективність, при цьому оптимізація одного параметру не призводить до підвищення загальної ефективності;

- «взаємо виключення» між економічною та екологічною стратегією освоєння – економічно переважне рішення передбачає застосування технологій з максимальним техногенним навантаженням на довкілля;

- критична потреба у визначенні необхідного обсягу вилучення корисної копалини, адже при видобутку стратегічних корисних копалин кількість вскришних робіт, як і відходів виробництва значно більші за обсяг вилученої корисної копалини, тому резервом підвищення ефективності є обґрунтування раціонального обсягу вилучення корисної копалини.

Окреслені вище проблеми є специфічними, проте є ще загальні, які полягають в оптимізації процесів та раціоналізації параметрів розробки родовищ корисних копалин. Розробка нового підходу, у вигляді методології та інструментів прийняття рішень, дозволить створити базу для вирішення означених питань.

Далі проаналізуємо існуючі підходи, щодо проектування. Це дозволить перейти до лаконічного огляду множини підходів. Але, перед цим охарактеризуємо моделі, якими можна описати виробничі процеси. Процеси управління та проектування гірничого виробництва можна розділити на 6 типів моделей: оптимізаційні, інформаційні, детерміновані, ймовірнісні, статичні, динамічні.

Оптимізаційні моделі містять в собі опис умов функціонування об'єкту у вигляді рівнянь та нерівностей, які являють собою обмеження задачі і відображають баланс ресурсів (матеріальних, трудових, фінансових, тощо). Особливістю оптимізаційних моделей є те, що існує ряд допустимих рішень (іноді нескінченна більшість), серед яких слід виділити оптимальне.

Інформаційні моделі містять вихідну інформацію необхідну для ухвалення рішення. За допомогою цих моделей можна встановити регресійний зв'язок між факторними та результативними ознаками. В цих типах моделей функціонування об'єкту описується рівняннями, за допомогою котрих встановлюється кількісний зв'язок між системами вхідних та вихідних параметрів.

Детерміновані моделі передбачають причинно-наслідковий зв'язок в моделі, котрий взаємообумовлений та можна виразити аналітично, тобто фактор випадковості вважається несуттєвим.

Ймовірнісні моделі враховують дію випадкових факторів на економічні та організаційні явища та процеси. До ймовірнісних моделей відносяться моделі теорії надійності, масового обслуговування, прогнозу показників гірничо-шахтного обладнання, кар'єрного транспорту, тощо.

Статичні моделі застосовують коли параметри визначеної системи, у визначеному часовому проміжку, яка описує діяльність та умови функціонування об'єкту практично не змінюються.

У разі, якщо параметри системи змінюються суттєво в часі – застосовуються динамічні моделі.

Варто зазначити, що методи математичного програмування різняться лише за вимогами до обмеження. Якщо обмеження функції мети лінійні, то застосовують методи лінійного програмування, якщо обмеження або цільова функція задані нелінійними обмеженнями застосовують нелінійне програмування; якщо на компоненти вектора  $X$  рішення накладається вимога цілочисельності, то цілочисельне програмування. Якщо враховують фактор ви-

падковості, то застосовують стохастичне програмування. Для врахування часу – динамічне програмування.

Після цього можна перейти до аналізу праць, які було поділено за типами класифікацій.

Існує декілька класифікацій, які умовно можна поділити на:

1) Класифікацію, яка базується на застосуванні економіко-математичних методів, яка в свою чергу передбачає поділ на моделі: ймовірнісні, стохастичні, детерміновані, статичні, динамічні, тощо.

2) Класифікацію, яка базується на типі отриманого рішення: інформаційні, оптимізаційні.

3) Класифікацію, яка базується на довготривалості прогнозування (короткострокове, довгострокове) та способу отримання рішення (за допомогою програмного забезпечення, імітаційного моделювання).

Зупинимось на кожній класифікації окремо та проаналізуємо основні праці.

В основу класифікації на основі економіко-математичних методів [1] покладено інструменти (математичні), які застосовуються для побудови моделі. Відомі наступні методи: математичне програмування, яке поділяється на лінійне [2], квадратичне [3], цілочисельне [4], стохастичне [5], динамічне [6], геометричне [7]; керування запасами [8], теорія ігор [9], мережеві моделі [10], кореляційні моделі [11], теорія масового обслуговування [12], теорія надійності [13], прогнозування [14], імітаційне моделювання [15]. При застосуванні лінійного, квадратичного, цілочисельного програмування можна реалізувати оптимізаційні, детерміновані, статичні моделі; для стохастичного: оптимізаційні, ймовірнісні, статичні; для динамічного програмування – оптимізаційні, детерміновані, ймовірнісні, динамічні; для геометричного – оптимізаційні, детерміновані, статичні, динамічні. При управлінні запасами реалізуються оптимізаційні, детерміновані, ймовірнісні, статичні, динамічні моделі. При застосуванні теорії ігор – оптимізаційні, детерміновані, ймовірнісні, статичні, динамічні моделі. Для мережевих моделей, як економіко-математичного методу, можливі оптимізаційні, інформаційні, детерміновані, ймовірнісні, статичні моделі. Кореляційні методи, як і теорія масового обслуговування, реалізують інформаційні, ймовірнісні, статичні моделі. Для теорії надійності, прогнозування, імітаційного моделювання реалізуються – інформаційні, ймовірнісні, статичні та динамічні моделі.

До недоліків цієї класифікації можна віднести те, що методи розділені за типом цільової функції, а також інструментом прийняття рішень, проте не описано область застосування, тобто «раціональність способу». Окрім цього, не враховується взаємозв'язок виробничих процесів.

Розглянуті роботи [1–15] і методи, можуть бути застосовані при короткостроковому плануванні. Однак, на процедуру ухвалення рішень впливають не тільки економічні, технологічні, соціальні фактори, але і якісні. У разі, якщо за цільову функцію приймемо, наприклад питому собівартість або витрати на транспортування [16] рішення буде оптимальним за визначеним параметром, проте, існує висока вірогідність того, що не буде відповідати характеристиці «якості» – сукупності ознак, яка характеризує об'єкт (для корисної копалини – ступінь зuboжіння, зольність, тощо; а для підприємства

– інфраструктура, розташування, зв'язок із постачальниками та споживачами, тощо).

Саме тому, було розглянуто і сформовано класифікацію методів на основі типу отриманого рішення [17]. У відповідності до цієї класифікації методи діляться на оптимізаційні та інформаційні. Оптимізаційні моделі дають відповідь на питання, яке рішення є оптимальним з кількісної точки зору, а інформаційні – з якісної. До оптимізаційних методів відносяться усі наведені вище методи математичного програмування [2–7], а також теорія ігор, мережеві, кореляційні моделі. Інформаційні моделі базуються на застосуванні методу аналізу ієрархій АНР [18] і його різновидів PROMETHEE [19], ELECTRE [20], TODIM [21], VICOR [22], Fuzzy-АНР [23], Grey-АНР [24]; методів нечітких множин [25]. Сутність цих підходів базується на побудові пріоритетів та ієрархій. Отримане рішення буде якісним, проте залежить виключно від рівня експертів. Досить часто існують ситуації, коли значення одного параметру істотно впливає на процес прийняття рішень (наприклад – витрати на розробку родовища, вартість обладнання, тощо) і неможливо побудувати матрицю зв'язності [26]. До недоліків можна віднести те, що процедура прийняття рішень потребує застосування спеціального програмного забезпечення, а отримане рішення не має «варіативності».

Для усунення недоліків першої та другої групи методів (описаних у попередніх класифікаціях) було розглянуто ще одну класифікацію [27], яка базується на термінах планування та інструментах. Як вже зазначалось раніше, методи умовно можна поділити на методи довгострокового планування та короткострокового – усі вони базуються на описаних вище [2–15, 18–25], але автор дослідження виділяє в окрему групу підходи на основі імітаційного моделювання [28] групи виробничих параметрів. Ці параметри можуть враховувати якісні або економічні показники, що в подальшому дозволить планувати виробничу діяльність. Різниця полягає лише в методі імітаційного моделювання. Слід зазначити, що в роботі [27] акцент робиться на виокремленні методів, які базуються на основі застосування програмного забезпечення. Логіка полягає в тому, що за допомогою програмного забезпечення можна розділити об'ємну задачу на локальні (нескінченно малу частину) та за допомогою алгоритмів для кожної локальної області знайти оптимальне рішення.

Із аналізу останніх праць [29–32] можна зробити наступне узагальнення, яке формує тренди створення підходів, щодо проектування процесів освоєння родовищ корисних копалин:

- критерієм оптимальності є «якість», проте вирізняється різними кількісними показниками;
- загальні задачі розділяються на локальні, лише після оптимізації задачі на першому етапі переходять до оптимізації на другому, та далі.

На основі аналізу досліджень можна сформулювати мету та завдання дослідження.

## 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження полягає у створенні нового підходу, щодо проектування процесів освоєння родовищ корисних копалин. Для цього слід виконати ряд задач:

- розробити методологічний підхід, щодо оптимізації багатопараметричних процесів освоєння родовищ корисних копалин;
- запропонувати алгоритм проектування процесів освоєння та навести область застосування.

У відповідності до поставленої мети слід розробити новий підхід, який дозволить врахувати багатоманіття параметрів та різний ступінь їх впливу на кінцеву ефективність. Це можна здійснити за допомогою декомпозиційного підходу. Ідея декомпозиційного підходу полягає в тому, що на кожному етапі визначається один – головний параметр, а інші – як допоміжні. Від оптимізації саме цього параметру залежить ефективність процесу в цей проміжок часу. Це дозволяє значно заощадити обчислювальні ресурси та значно пришвидшити процес прийняття рішень.

Для процесів освоєння родовищ це можна здійснити процедурою представлення життєвого циклу родовища у вигляді декомпозиційної схеми, у вигляді мережевої моделі, яка відображає зміну стану запасів від балансових до кінцевої продукції. При цьому в цій схемі кожній альтернативі відповідають реальні зв'язки, оптимальному рішенню відповідає найкоротший маршрут від початкової вершини до кінцевої. Пошук маршруту можна здійснювати, як в прямому та і у зворотному порядку, але обов'язковою умовою є принцип «оптимальності Р. Беллмана» [33], коли для управління на кожному кроці треба вибирати так, щоб оптимальною була сума виграшів на всіх, що залишилися до кінця процесу, кроках, включаючи виграш на даному кроці, тобто без знаходження найкращого рішення неможливо перейти до процедури пошуку оптимального рішення на наступному кроці. Кожному кроку в процедурі пошуку оптимального рішення відповідає певний етап у життєвому циклі родовища.

При цьому, можлива наявність проміжних кроків в рамках основного етапу життєдіяльності, тобто схема демонструє життєвий цикл родовища за основними етапами: розвідка, розкриття, підготовка, проходка, видобуток та ін., но при цьому можливо в рамках кожного етапу передбачати додаткові кроки, які властиві лише цьому варіанту.

Пошук оптимального рішення можна здійснити за допомогою алгоритму Флойда [34]. Суть алгоритму: є вершини графу  $G = (V, E), |V| = n$  пронумеровано від 1 до  $n$ , тоді введемо позначення для найкоротшого маршруту від  $i$  до  $j$  у вигляді  $d_{ij}^k$ , який окрім вершин  $i$  та  $j$  проходить тільки через вершини  $1 \dots k$ . Тоді,  $d_{ij}^0$  – довжина ребра (дуги) між вершинами  $i$  та  $j$ , в іншому випадку  $d_{ij}^0 = \infty$ .

Існують лише 2 можливих варіанти, яке може приймати довжина ребра  $d_{ij}^k$ ,  $k \in (1, \dots, n)$ :

1)  $d_{ij}^k = d_{ij}^{k-1}$  – тобто, найкоротший маршрут між вершинами  $i$  та  $j$  не проходить через вершину  $k$ ;

2)  $d_{ij}^k = d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}$  – тобто, існує такий найкоротший маршрут між вершинами  $i$  та  $j$ , який проходить через вершину  $k$ , коли від спочатку проходить від  $i$  до  $k$ , а потім від  $k$  до  $j$ .

Тоді, стає зрозуміло, що для знаходження найкоротшого маршруту необхідно знайти мінімальне значення серед двох значень:  $d_{ij}^k = d_{ij}^{k-1}$  та

$$d_{ij}^k = d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}.$$

Алгоритм Флойду можна записати однією рекурентною формулою

$$d_{ij}^k = \min(d_{ij}^{k-1}, d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}).$$

Алгоритм Флойду послідовно визначає усі значення  $d_{ij}^k$ ,  $\forall i, j$  для  $k$  від 1 до  $N$ . Значення  $d_{ij}^k$  – є найкоротшими маршрутами між усіма парами вершин  $i$  та  $j$ .

В результаті вирішення задачі буде оптимізовано параметри експлуатації родовища на кожному етапі. Основою для цього є модель дослідження зміни стану запасів.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У відповідності до сформульованих вище завдань дослідження запропонуємо новий підхід щодо підвищення ефективності процесу розробки родовищ корисних копалин. На першому етапі слід зосередити увагу на критерії оптимальності. Для цього може бути прийнята категорія «якість». Це філософська категорія, що виражає сукупність істотних ознак, особливостей і властивостей, які відрізняють один предмет або явище від інших і надають йому визначеність. Якість предмета або явища, як правило, не зводиться до окремих його властивостей. Воно пов'язане з предметом як цілим, охоплює його повністю і невіддільне від нього. Тому поняття якості зв'язується з буттям предмета. Предмет не може, залишаючись самим собою, втратити свою якість [35]. Таким чином, ця категорія є універсальною незалежно від типу корисної копалини. Для вугілля категорією «якість» виступає зольність, а для руди – ступінь зубожіння. Також, в умовах екологічно забруднюючого виробництва для особливо цінних корисних копалин (наприклад, золото) до категорії «якість» можна віднести ступінь негативного впливу на довкілля, який визначено на основі експертної оцінки з боку екологів [36-38]. Із категорії «якість» слідує наступне важливе визначення, сукупність ознак визна-

чає сам процес, це є і зміна стану запасів, тобто вугілля проходить етап від видобутої корисної копалини до електроенергії або металу. Також руда проходить шлях від відбитої гірничої маси до металу, при цьому кожен проміжний етап визначає ефективність процесу в цілому. Наприклад, при розгляді технології видобутку залізної руди [39] необхідно раціонально спроектувати процес відбивання руди, який включає первинну та вторинну відбійку, випуск руди, навантаження і лише після цього видачу на поверхню. Всі ці етапи істотно впливають на ступінь зубожіння руди.

Поняття «оцінка» параметра слід розглядати в більш широкому сенсі, тобто це не стільки кількісна характеристика, а більше системний чинник (світоглядний), тобто проектувальник визначає сам, який параметр є визначальним та впливає на кінцеву ефективність процесу. Незалежно від технології та типу корисної копалини враховують увесь процес в цілому, а також ступінь техногенного впливу на довкілля.

Для вирішення поставленої задачі використано методи динамічного програмування. Зокрема процес прийняття рішень може бути розглянутий за допомогою функціонального рівняння

$$\frac{\partial x(t)}{\partial t} = f(x(t), u(t), t); x(\tau) = y; \tau \leq t \leq t_1 \quad (1)$$

де  $\tau$  – довільний параметр;  $y$  – довільний вектор.

Інваріантний спосіб з прямим зануренням дозволяє розглянути виробничий процес у часі  $t$  при обмеженому обсязі ресурсів. При цьому розглядаються всі можливі рішення і кожне наступне рішення (альтернатива) не гірше попереднього (рис. 1).

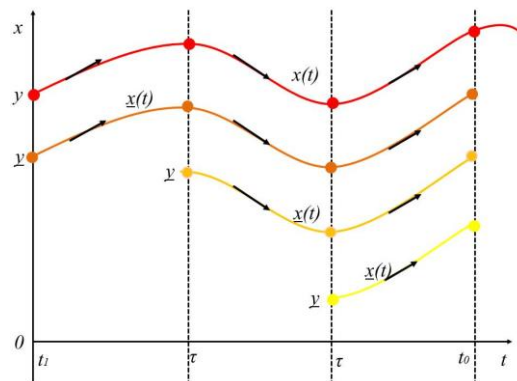


Рисунок 1. Схема процедури пошуку оптимального рішення

Для прийняття рішення представимо процес пошуку кінцевого рішення у вигляді сукупності процедур пошуку оптимальних рішень на кожному з етапів (рис. 2), для цього представимо рівняння (1) у вигляді

$$x(t + 1) = f(x(t), u(t), t); x(\tau) = y; \tau \leq t \leq t_1. \quad (2)$$



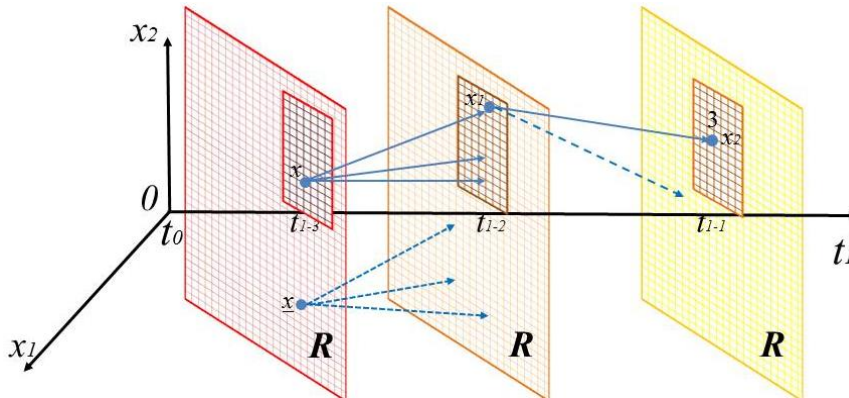


Рисунок 2. Схема обчислювальної процедури

Процес пошуку рішення полягає в дослідженні можливих векторів рішень  $x$  на відповідність області оптимальних рішень  $F^0$ , якщо значення вектора  $x$  в момент часу  $t$  дорівнює  $F \leq F^0$  потрібно запам'ятати результат і відкласти його (запам'ятати) на фазовій сітці  $x$ , інакше перервати пошук. Після цього на основі відгуків  $x$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  обчислити значення оптимізаційного параметра.

Застосування графів та мережевих моделей дозволяє в наочному та компактному вигляді представити інформацію про можливі технологічні схеми у виробництві, а також систематизувати данні. Ідея полягає у наступному – усі можливі варіанти освоєння родовищ можна представити у вигляді впорядкованої структури – графу, де кожній вершині відповідає окреме рішення (альтернатива), яке може бути прийняте, а відстань між вершинами (ребро) має свою довжину, яка відповідає значенню параметра, який слід оптимізувати (собівартість, трудомісткість, часові витрати та ін.). При цьому модель структурована за етапами (рівнями), тобто вершинами можуть відповідати альтернативні варіанти розвідки родовища, можливі варіанти розробки родовищ, можливі технології розробки і т.д.

Таким чином, для пошуку оптимальної стратегії освоєння родовища усі можливі варіанти слід представити у вигляді впорядкованої структури – графу. Після цього слід задати значення оптимізаційного параметру (в нашому випадку витрати на проведення кожного етапу розробки родовища) у вигляді відстані між вершинами графу. Сукупність вершин, які відповідають етапам та відстаней між вершинами, які відповідають значенню оптимізаційного параметру формують мережеву модель. У залежності від порядку розгляду моделі можна аналізувати, як екологічні так і економічні варіанти освоєння родовищ.

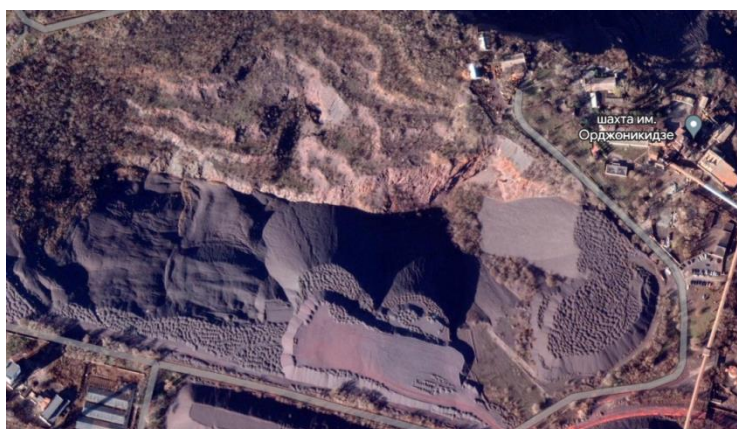
У відповідності до поставленої мети дослідження слід оптимізувати багатопараметричні процеси гірничого виробництва. У якості об'єкту дослідження було розглянуто процеси, які супроводжують кріплення гірничих виробок. Незалежно від типу корисної копалини площа відвалів становить істотні розміри по відношенню до підприємств.



*Рисунок 3. Відвал навколо шахти №1-3 «Новгородівська» ДП «Селідіввугілля»*



*Рисунок 4. Відвал навколо ДП ВК «Шахта «Краснолиманська»*



*Рисунок 5. Відвал навколо шахти ім. Орджонікідзе ПАТ «Центральный гірничо-збагачувальний комбінат»*



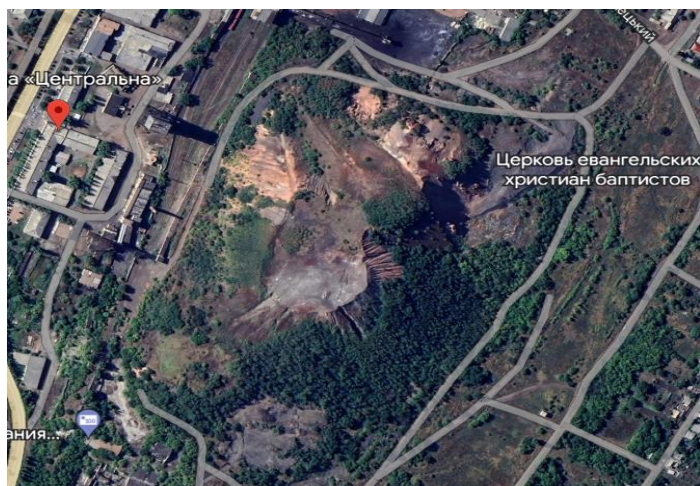


Рисунок 6. Відвал шахти «Центральна» ДП «Мирноградвугілля»



Рисунок 7. Відвал шахти ім. М.І. Сташкова ПрАТ ДТЕК «Павлоградвугілля»

Було розглянуто виробничу діяльність підприємств з видобутку вугілля та залізної руди (рис. 3-7). В табл. 1 наведено параметри відвалів.

У відповідності до поставленої мети дослідження та специфіки освоєння родовищ корисних копалин є ряд локальних задач, які можна вирішувати на основі декомпозиційного підходу, який було наведено у попередньому підрозділі:

- (I) відходи гірничого виробництва доцільно збагачувати та вилучати супутні корисні копалини, тоді цільовою функцією буде максимізація вартості тони гірничої маси (рис. 3, 4);

- (II) відходи гірничого виробництва не доцільно збагачувати, тоді цільовою функцією буде мінімізація собівартості видобутку 1 т гірничої маси (рис. 5, 6, 7) – стратегія полягає у застосуванні відходів гірничого виробництва у якості складових сумішей для закладки виробленого простору (видобуток

залізородної сировини) або залишенні максимального обсягу породи у підземному просторі за рахунок селективного виймання (видобуток вугілля).

**Таблиця 1. Параметри відвалів підприємств з видобутку корисних копалин**

Назва підприємства	Площа відвалу	Корисна копалина	Стратегія
Шахта №1-3 «Новогродівська» ДП «Селидіввугілля»	129 480,62 м <sup>2</sup>	вугілля	Максимізація вартості 1 т корисної копалини
Шахта «Краснолиманська» ДП ВК «Шахта «Краснолиманська»	453 810,96 м <sup>2</sup>	вугілля	Максимізація вартості 1 т корисної копалини
Шахта ім. Орджонікідзе ПАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат»	247 729,07 м <sup>2</sup>	залізна руда	Мінімізація видобутку 1 т гірничої маси
Шахта «Центральна» ДП «Мирноградвугілля»	130 745,65 м <sup>2</sup>	вугілля	Мінімізація видобутку 1 т гірничої маси
Шахта ім. М.І. Сташкова ПрАТ ДТЕК «Павлоградвугілля»	240 552,91 м <sup>2</sup>	вугілля	Мінімізація вартості 1 т гірничої маси

В таблиці 2 наведено математичний опис стратегій освоєння.

Для вирішення задач, в залежності від доцільності збагачення відходів видобутку скористаємось моделлю дослідження зміни стану запасів [40].

**Таблиця 2. Стратегії освоєння родовищ корисних копалин**

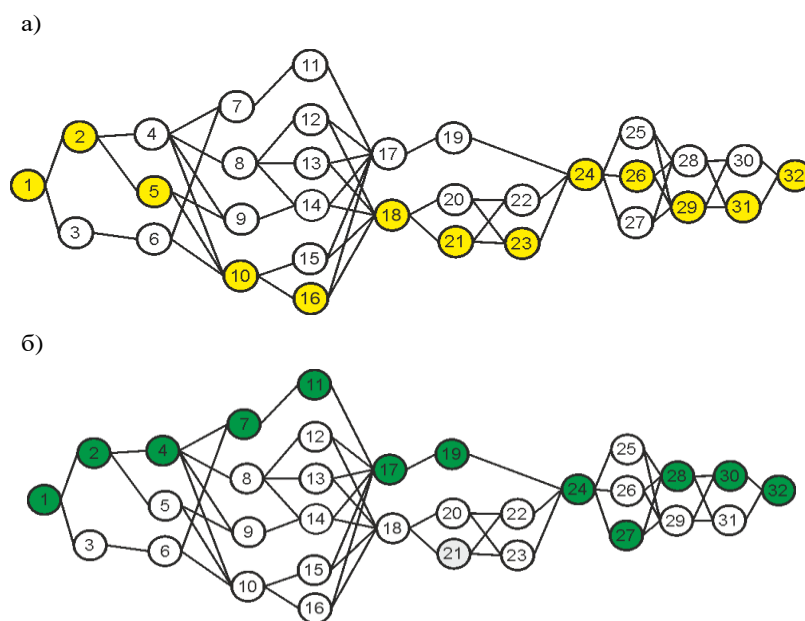
Доцільність переробки відходів (стратегія поводження)	Загальний опис	Математичний опис
доцільно (комплексне вилучення корисної копалини із 1 т гірничої маси)	максимізація вартості видобутої 1 т гірничої маси $P_G \rightarrow \max$	програмування альтернативного графу на максимум $G(V,E) \rightarrow \max$
недоцільно (зменшення кількості відходів, що надходять на поверхню або використання відходів у виробництві)	мінімізація вартості видобутку 1 т корисної копалини $P_K \rightarrow \min$	програмування альтернативного графу на мінімум $G(V,E) \rightarrow \min$

Вхідними умовами є не тільки гірничо-геологічні характеристики масиву, але і технологічні процеси з видобутку, збагачення, транспортування. Окрім цього, враховується доцільність збагачення відходів. На першій стадії запаси

підготовані до вилучення, тобто є очисний вибій, але процес видобутку ще не почався. На другій стадії, коли вже почався видобуток – запаси в стадії вилучення. На третій стадії – запаси в стадії активного керування масивом гірських порід – на цій стадії обирається спосіб управління покрівлею. На четвертій стадії запаси в стані підготовки до транспортування із очисного вибою (спорудження кріплення) – відбувається управління покрівлею в залежності від характеристики порід покрівлі та підшви (наприклад, зведення бутових кострів, зведення бутових смуг, закладка виробленого простору, тощо). Усього таких стадій – 11. Остання стадія – запаси в стані списання, тобто знаходяться у вигляді відвалів та необхідно обрати технологію рекултивациї.

У якості прикладу було розглянуто умови шахти ДП ВК «Краснолиманська». Було вирішено дві задачі: перша полягала у виборі способу управління станом масиву гірських порід з мінімізацією кількості відходів (рис. 8а), а друга – у максимізації вартості 1 т гірської маси (рис. 8б).

В таблиці 3 наведено результати з вибору оптимальної технології видобутку вугілля для умов ДП ВК «Шахта «Краснолиманська». Було розглянуто два сценарії виробництва.



**Рисунок 8. Мережева модель для вибору технології видобутку вугілля для шахти ДП ВК «Краснолиманська» (а – для мінімізації кількості відходів, б – для максимізації вартості 1 т корисної копалини); зафарбовані вершини відповідають оптимальному рішення**

Таблиця 3. Результати вибору оптимальної стратегії видобутку корисної копалини (вугілля) для умов ДП ВК «Шахта «Краснолиманська» (за двома сценаріями)

Стратегія	Математичний опис	Найкоротший маршрут	Довжина, у.о.	Опис технології
мінімізація вартості видобутку 1 т корисної копалини $P_K \rightarrow \min$	$G(V,E) \rightarrow \min$	1-2-5-10-16-18-21-23-24-26-29-31-32	160	селективна технологія виймання з повною закладкою виробленого простору
максимізація вартості видобутої 1 т гірничої маси $P_G \rightarrow \max$	$G(V,E) \rightarrow \max$	1-2-4-7-11-17-19-24-27-28-30-32	208	комбайнова «валова» технологія, спосіб управління покрівлею – повне обвалення, з розділенням вантажопотоків вугілля та породи, а також передбачає додаткову стадію збагачення корисної копалини

Під «довжиною» розуміємо величину оптимізаційного параметру (в нашому випадку «питома собівартість видобутку»).

Кожній вершині на рис. 8а-8б відповідає альтернативне технологічне рішення, а кожен відрізок (ребро), який з'єднує вершини, демонструє можливі зв'язки. У відповідності до моделі дослідження зміни стану запасів слід проаналізувати можливі технологічні рішення, яким відповідають вершини 1–32. При цьому вершина 1 – початкова і не має «ваги» (значення оптимізаційного параметру), а потрібна лише для початку виконання алгоритму. Вершина 32 – кінцева, також не має ваги, а необхідна для завершення пошуку оптимального рішення. Як зазначалось раніше, на першій стадії запаси підготовані до вилучення, тобто є очисний вибій і необхідно обрати тип виймальної машини (вершини 2 та 3). Для рис. 8а-8б вершині 2 відповідає тип виймання вугілля очисним комбайном, а відстань між вершиною 1 та 2 відповідає питомій собівартості видобутку вугілля очисним комбайном; вершині 3 відповідає тип виймання вугілля стругом, а відстань між вершинами 1 та 3 відповідає питомій собівартості видобутку вугілля стругом. Аналогічним чином, вершинам 4–6 (друга стадія) відповідають технології виймання вугілля; вершинам 7–10 тип управління покрівлею (третя стадія); вершинам 11–16 (четверта стадія) можливі технологічні модулі, які відповідають способам управління покрівлею. Всього таких стадій 11. Оптимальне рішення буде

відповідати найкоротшому маршруту між 1 та 32 вершиною (коли відходи недоцільно збагачувати) або найдовшому (який має найбільшу цінність, коли відходи доцільно збагачувати). На рис. 9 продемонстровано опис графу зміни стану запасів.

Етап	Найменування етапу процесу зміни стану запасів	Номер циклу (початок)	Змінна системи в циклі (кінець)	Сенс логічної змінної	Значення дуги
1	Запаси в стані підготовки до вилучення	1	2	Виймання вугілля за допомогою очисних комбайнів.	$S_1^1$
		1	3	Виймання вугілля за допомогою стругової технології.	$S_1^2$
2	Запаси в стані механізованого вилучення	2	4	Виймання вугілля за селективною технологією.	$S_2^1$
		2	5	Виймання вугілля за традиційною «човниковою» технологією.	$S_2^2$
		3	6	Виймання вугілля за традиційною «човниковою» технологією.	$S_2^3$
3	Запаси в стані активного управління масивом гірських порід	4	7	Управління покрівлею способом повного обвалення.	$S_3^1$
		4	8	Управління покрівлею способом часткового обвалення.	$S_3^2$
		4	9	Управління покрівлею способом часткової закладки виробленого простору.	$S_3^2$
		4	10	Управління покрівлею способом повної закладки виробленого простору.	$S_3^3$

Рисунок 9. Фрагмент моделі опису зміни стану запасів

Застосування графів і мережевих моделей дозволяє вирішити зазначене завдання. Головна умова вирішення цього завдання – взаємозв'язок всіх етапів між собою. Кожній вершині відповідає окреме рішення (альтернатива), яке може бути прийняте, а відстань між вершинами (ребро) має свою довжину, яка відповідає значенню параметра, який слід оптимізувати (собівартість, трудомісткість, часові витрати та ін.). Для гірничо-геологічних умов ДП ВК «Краснолиманська» у відповідності до нормативних документів існує чотири способи управління покрівлею: повне обвалення, часткове обвалення, часткова закладка виробленого простору, повна закладка виробленого простору. Кожен із способів передбачає варіанти технологічних схем. Усі можливі альтернативи представлені на рис. 8.

Задача мінімізації кількості відходів зводиться до пошуку найкоротшого маршруту від початкової 1 до кінцевої 32 вершини. Вирішується програмуванням альтернативного графу на мінімум. В нашому випадку це селективна технологія виймання з повною закладкою виробленого простору.

Задача максимізації вартості 1 т корисної копалини зводиться до пошуку «важчого», найдовшого маршруту від початкової 1 до кінцевої 32 вершини. Для цього програмуємо альтернативний граф на максимум. Для нашого випадку це комбайнова «валова» технологія, спосіб управління покрівлею – повне обвалення, з розділенням вантажопотоків вугілля та породи, а також передбачаємо додаткову стадію збагачення корисної копалини.

Як видно із табл. 2 стратегія максимізації вартості 1 т гірської маси має більшу питому собівартість видобутку, проте очікуваний економічний ефект на 25–30% вищий. Було проведено розрахунок очікуваного економічного ефекту від запровадження технологічного рішення, яке передбачає вилучення рідкоземельних металів із відходів вуглевидобутку. Встановлено, що вартість 1 т гірської маси для стратегії мінімізації вартості видобутку 1 т корисної копалини складе 2400 у.о./т, а для стратегії максимізації вартості 1 т гірської маси – 2970 у.о./т. за рахунок видобутку не тільки вугілля, але і рідкоземельних металів із породи.

Розрахувавши собівартість видобутку за кожним елементом (для двох стратегій): матеріальні витрати, витрати на оплату праці, витрати на нарахування на оплату праці, амортизація виробничих фондів, невиробничі витрати було розраховано валовий дохід, рентабельність та визначено розрахунковий очікуваний річний прибуток. Для стратегії мінімізації собівартості видобутку 1 т корисної копалини річний прибуток склав 10 млн. 120 тис. у.о./рік, а для стратегії максимізації вартості 1 т гірської маси складе 12 млн. 953 тис. у.о./рік, що складе 28%. Збільшення економічного ефекту досягається за рахунок збільшення валового доходу підприємства, а також зменшення витрат на рекультивацию. Окрім цього, передбачено додаткові заходи зі зниження техногенного навантаження на довкілля.

#### **4. ВИСНОВКИ**

В процесі виконання дослідження було розроблено новий підхід, щодо проектування багатопараметричних процесів освоєння родовищ корисних копалин. Розробка нового підходу базувалась на моделі дослідження стану запасів. Це відбулось завдяки отриманим науковим результатам, які можуть бути сформовані наступним чином:

1) Було проаналізовано існуючі класифікації методів проектування процесів гірничого виробництва, які базуються на методах, моделях, процедурах отримання кінцевого рішення. Встановлено, що наразі основним трендом у проектуванні процесів є підвищення якості, комплексне використання ресурсів, зниження техногенного навантаження на довкілля. Основою реалізації підходів є наявність сучасного програмного забезпечення.

2) Для врахування багатоманітності параметрів та їх ступеню впливу на загальну ефективність (на різних етапах освоєння родовищ) є застосування декомпозиційного підходу, коли задача розбивається на рівні і на кожному



рівні є одна цільова функція яку варто оптимізувати. Формалізація завдання проєктування полягає у представленні альтернативних варіантів технологій у вигляді мережевих моделей. Застосування алгоритмів оптимізації на мережах та графах дозволяє знайти оптимальне рішення.

3) Вперше запропоновано алгоритм проєктування багатопараметричних процесів гірничого виробництва, який передбачає визначення доцільності збагачення відходів виробництва, створення стратегії освоєння, пошук оптимального рішення за допомогою алгоритмів оптимізації. У разі, якщо відходи гірничого виробництва не доцільно збагачувати слід мінімізувати собівартість видобутку 1 т корисної копалини та розглянути можливість застосування відходів у вигляді компонентів сумішей для закладки виробленого простору. Якщо відходи становлять цінність, то слід максимізувати 1 т гірської маси – це досягається шляхом підвищення якості та повнотою вилучення.

4) Для підвищення розмірності задач з пошуку оптимального рішення, а також автоматизації розрахунків було запропоновано математичний опис, програмну реалізацію, системи підтримки прийняття рішень у вигляді спеціалізованого програмного забезпечення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Amosha, O.I., Salli, V.I., Tryfonova, O.V., & Symonenko, O.I. (2007). *Kil'kisni parametry investytsiynoyi pryvablyvosti vuhil'nykh shakht*. Dnipropetrovs'k: NHU. 110 p. (in Ukrainian)
2. Huang, S., Li, G., Ben-Auwah, E., Afum, B.O., & Hu, N. (2020). A robust mixed integer linear programming framework for underground cut-and-fill mining production scheduling. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(6), 397-414. <https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1576576>
3. Khodayari, F., & Pourrahimian, Y. (2016, October). Quadratic programming application in block-cave mining. In *1st International Conference on underground Mining, Santiago, Chile* (pp. 427-438).
4. Topal, J. L. E. (2011). Strategies to assist in obtaining an optimal solution for an underground mine planning problem using Mixed Integer Programming. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 3(2), 152-172. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2011.042429>
5. MacNeil, J.A., & Dimitrakopoulos, R.G. (2017). A stochastic optimization formulation for the transition from open pit to underground mining. *Optimization and Engineering*, 18, 793-813. <https://doi.org/10.1007/s11081-017-9361-6>
6. Khorolskyi, A., Hrinov, V., & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 463-471.
7. Balezentis, T., Streimikiene, D., & Siksnelyte-Butkiene, I. (2021). Energy storage selection for sustainable energy development: The multi-criteria utility analysis based on the ideal solutions and integer geometric programming for coordination degree. *Environmental Impact Assessment Review*, 91, 106675. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106675>
8. Hill, A., Brickey, A.J., Cipriano, I., Goycoolea, M., & Newman, A. (2022). Optimization Strategies for Resource-Constrained Project Scheduling Problems in Underground Mining. *INFORMS Journal on Computing*, 34(6), 3042-3058. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2022.1222>

9. Özyurt, M.C., & Karadogan, A. (2020). A new model based on artificial neural networks and game theory for the selection of underground mining method. *Journal of Mining Science*, 56, 66-78. <https://doi.org/10.1134/S1062739120016491>
10. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Fomychova, L. (2020). Research into optimization model for balancing the technological flows at mining enterprises. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 201, p. 01030). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101030>
11. Petlovanyi, M., Sai, K., Malashkevych, D., Popovych, V., & Khorolskyi, A. (2023, April). Influence of waste rock dump placement on the geomechanical state of underground mine workings. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1156, No. 1, p. 012007). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/1156/1/012007
12. Kwinta, A., & Gradka, R. (2020). Analysis of the damage influence range generated by underground mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 128, 104263. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104263>
13. Vayenas, N., & Peng, S. (2014). Reliability analysis of underground mining equipment using genetic algorithms: A case study of two mine hoists. *Journal of Quality in maintenance Engineering*, 20(1), 32-50. <https://doi.org/10.1108/JQME-02-2013-0006>
14. Zarębska, K., Baran, P., Cygankiewicz, J., & Dudzińska, A. (2012). Prognosticating fire hazards in goafs in Polish collieries. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 29(4).
15. Yueze, L., Akhtar, S., Sasmito, A.P., & Kurnia, J.C. (2017). Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(4), 657-662. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.019>
16. Bazaluk, O., Ashcheulova, O., Mamaikin, O., Khorolskyi, A., Lozynskyi, V., & Saik, P. (2022). Innovative activities in the sphere of mining process management. *Frontiers in Environmental Science*, 304. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.878977>
17. Hrinov, V., & Khorolskyi, A. (2018). Improving the process of coal extraction based on the parameter optimization of mining equipment. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 60, p. 00017). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017>
18. Saaty, T.L., Vargas, L.G., Saaty, T.L., & Vargas, L.G. (2013). The analytic network process (pp. 1-40). Springer US.
19. Balusa, B.C., & Singam, J. (2018). Underground mining method selection using WPM and PROMETHEE. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 99, 165-171. <https://doi.org/10.1007/s40033-017-0137-0>
20. Balusa, B.C., & Gorai, A.K. (2019). A comparative study of various multi-criteria decision-making models in underground mining method selection. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 100, 105-121. <https://doi.org/10.1007/s40033-018-0169-0>
21. Liang, W., Zhao, G., Wu, H., & Chen, Y. (2019). Assessing the risk degree of goafs by employing hybrid TODIM method under uncertainty. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 3767-3782. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1340-4>
22. Pak, M. C., Han, U. C., & Kim, D. I. (2022). Suitable Mining Method Selection using HFGDM-TOPSIS Method: a Case Study of an Apatite Mine. *Journal of Mining and Environment*, 13(2), 357-374. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11713.2163>
23. Alavi, I., & Alinejad-Rokny, H. (2011). Comparison of Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods for plant species selection (case study: reclamation plan of sungun Copper Mine; Iran). *Australian journal of basic and applied sciences*, 5(12), 1104-1113.
24. Sahoo, S., Dhar, A., Kar, A., & Ram, P. (2017). Grey analytic hierarchy process applied to effectiveness evaluation for groundwater potential zone delineation. *Geocarto International*, 32(11), 1188-1205. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1195888>

25. Yang, W., Xia, X., Pan, B., Gu, C., & Yue, J. (2016). The fuzzy comprehensive evaluation of water and sand inrush risk during underground mining. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30(4), 2289-2295. DOI: 10.3233/IFS-151998
26. Pérez, J., Jimeno, J. L., & Mokotoff, E. (2006). Another potential shortcoming of AHP. *Top*, 14, 99-111. <https://doi.org/10.1007/BF02579004>
27. Paravarzar, S., Pourrahimian, Y., Askari-Nasab, H., & Emery, X. (2021). Short-term underground mine planning: a review. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 12(1), 1-33. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2021.114902>
28. Reinhart, R., Dang, T., Hand, E., Papachristos, C., & Alexis, K. (2020, May). Learning-based path planning for autonomous exploration of subterranean environments. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 1215-1221). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196662>
29. Li, S., Huang, Q., Hu, B., Pan, J., Chen, J., Yang, J., & Yu, H. (2023). Mining method optimization of difficult-to-mine complicated orebody using Pythagorean fuzzy sets and TOPSIS method. *Sustainability*, 15(4), 3692. <https://doi.org/10.3390/su15043692>
30. Erdogan, G., & Yavuz, M. (2017, December). Application of Three Existing Stope Boundary Optimisation Methods in an Operating Underground Mine. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 95, No. 4, p. 042077). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/95/4/042077
31. Brazil, M., & Grossman, P. (2008, September). Access layout optimization for underground mines. In *Australian Mining Technology Conference, Queensland*, 119-128.
32. Emdini Gliwan, S., & Crowe, K. (2022). A Network Flow Model for Operational Planning in an Underground Gold Mine. *Mining*, 2(4), 712-724. <https://doi.org/10.3390/mining2040039>
33. Bellman, R.E. (2010). *Dynamic programming*. Princeton university press. <https://doi.org/10.1515/9781400835386>
34. Burfield, C. (2013). *Floyd-Warshall algorithm*. Massachusetts Institute of Technology.
35. Weber, A., Kreuzer, M., & Knoll, A. (2020, May). A generalized Bellman-Ford algorithm for application in symbolic optimal control. In *2020 European Control Conference (ECC)* (pp. 2007-2014). IEEE. <https://doi.org/10.23919/ECC51009.2020.9143743>
36. Broumi, S., Bakal, A., Talea, M., Smarandache, F., & Vladareanu, L. (2016, November). Applying Dijkstra algorithm for solving neutrosophic shortest path problem. In *2016 International conference on advanced mechatronic systems (ICAMechS)* (pp. 412-416). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAMechS.2016.7813483>
37. Khorolskyi, A.O. (2021). Naukovi osnovy obgruntuvannia mezh oblasti ratsionalnoho proiektuvannia pry vidpratsiuvanni rodovyshch korysnykh kopalyn. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornoho proyzvodstva*, (23), 149-173. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.011>
38. Khorolskyi, A.O. (2022). Rezul'taty doslidzhen' iz rozrobky systemy pidtrymky pryunyattya rishen' dlya proyektuvannya protsesiv osvoyennya rodovyshch korysnykh kopalyn. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 2(51), 122-135. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-122-135> (in Ukrainian)
39. Грін'юв В.Г., Хорольський А.О. (2022). Визначення доцільності відпрацювання родовищ на стадії передпроектних досліджень раціональної стратегії їх освоєння. *Мінеральні ресурси України*, №2, С. 12-17. <https://doi.org/10.31996/mru.2022.2.12-17>
40. Хорольський А.О. (2023). Проектування процесів освоєння родовищ корисних копалин на основі дослідження зміни стану запасів. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна»*, 1(29), 83-97. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-1\(29\)-83-97](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-1(29)-83-97)

## REFERENCES

1. Amosha, O.I., Salli, V.I., Tryfonova, O.V., & Symonenko, O.I. (2007). *Kil'kisni parametry investytsiynoyi pryvablyvosti vuhil'nykh shakht*. Dnipropetrovs'k: NHU. 110 p. (in Ukrainian)
2. Huang, S., Li, G., Ben-Awuah, E., Afum, B. O., & Hu, N. (2020). A robust mixed integer linear programming framework for underground cut-and-fill mining production scheduling. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(6), 397-414. <https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1576576>
3. Khodayari, F., & Pourrahimian, Y. (2016, October). Quadratic programming application in block-cave mining. In *1st International Conference on underground Mining, Santiago, Chile* (pp. 427-438).
4. Topal, J. L. E. (2011). Strategies to assist in obtaining an optimal solution for an underground mine planning problem using Mixed Integer Programming. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 3(2), 152-172. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2011.042429>
5. MacNeil, J.A., & Dimitrakopoulos, R.G. (2017). A stochastic optimization formulation for the transition from open pit to underground mining. *Optimization and Engineering*, 18, 793-813. <https://doi.org/10.1007/s11081-017-9361-6>
6. Khorolskyi, A., Hrinov, V., & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 463-471.
7. Balezentis, T., Streimikiene, D., & Siksnyte-Butkiene, I. (2021). Energy storage selection for sustainable energy development: The multi-criteria utility analysis based on the ideal solutions and integer geometric programming for coordination degree. *Environmental Impact Assessment Review*, 91, 106675. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106675>
8. Hill, A., Brickey, A. J., Cipriano, I., Goycoolea, M., & Newman, A. (2022). Optimization Strategies for Resource-Constrained Project Scheduling Problems in Underground Mining. *INFORMS Journal on Computing*, 34(6), 3042-3058. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2022.1222>
9. Özyurt, M.C., & Karadogan, A. (2020). A new model based on artificial neural networks and game theory for the selection of underground mining method. *Journal of Mining Science*, 56, 66-78. <https://doi.org/10.1134/S1062739120016491>
10. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Fomychova, L. (2020). Research into optimization model for balancing the technological flows at mining enterprises. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 201, p. 01030). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101030>
11. Petlovanyi, M., Sai, K., Malashkevych, D., Popovych, V., & Khorolskyi, A. (2023, April). Influence of waste rock dump placement on the geomechanical state of underground mine workings. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1156, No. 1, p. 012007). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/1156/1/012007
12. Kwinta, A., & Gradka, R. (2020). Analysis of the damage influence range generated by underground mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 128, 104263. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104263>
13. Vayenas, N., & Peng, S. (2014). Reliability analysis of underground mining equipment using genetic algorithms: A case study of two mine hoists. *Journal of Quality in maintenance Engineering*, 20(1), 32-50. <https://doi.org/10.1108/JQME-02-2013-0006>
14. Zarębska, K., Baran, P., Cygankiewicz, J., & Dudzińska, A. (2012). Prognosticating fire hazards in goafs in Polish collieries. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 29(4).

15. Yuezze, L., Akhtar, S., Sasmito, A. P., & Kurnia, J. C. (2017). Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(4), 657-662. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.019>
16. Bazaluk, O., Ashcheulova, O., Mamaikin, O., Khorolskyi, A., Lozynskyi, V., & Saik, P. (2022). Innovative activities in the sphere of mining process management. *Frontiers in Environmental Science*, 304. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.878977>
17. Hrinov, V., & Khorolskyi, A. (2018). Improving the process of coal extraction based on the parameter optimization of mining equipment. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 60, p. 00017). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017>
18. Saaty, T.L., Vargas, L.G., Saaty, T.L., & Vargas, L.G. (2013). The analytic network process (pp. 1-40). Springer US.
19. Balusa, B.C., & Singam, J. (2018). Underground mining method selection using WPM and PROMETHEE. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 99, 165-171. <https://doi.org/10.1007/s40033-017-0137-0>
20. Balusa, B. C., & Gorai, A. K. (2019). A comparative study of various multi-criteria decision-making models in underground mining method selection. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 100, 105-121. <https://doi.org/10.1007/s40033-018-0169-0>
21. Liang, W., Zhao, G., Wu, H., & Chen, Y. (2019). Assessing the risk degree of goafs by employing hybrid TODIM method under uncertainty. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 3767-3782. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1340-4>
22. Pak, M. C., Han, U. C., & Kim, D. I. (2022). Suitable Mining Method Selection using HFGDM-TOPSIS Method: a Case Study of an Apatite Mine. *Journal of Mining and Environment*, 13(2), 357-374. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11713.2163>
23. Alavi, I., & Alinejad-Rokny, H. (2011). Comparison of Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods for plant species selection (case study: reclamation plan of sungun Copper Mine; Iran). *Australian journal of basic and applied sciences*, 5(12), 1104-1113.
24. Sahoo, S., Dhar, A., Kar, A., & Ram, P. (2017). Grey analytic hierarchy process applied to effectiveness evaluation for groundwater potential zone delineation. *Geocarto International*, 32(11), 1188-1205. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1195888>
25. Yang, W., Xia, X., Pan, B., Gu, C., & Yue, J. (2016). The fuzzy comprehensive evaluation of water and sand inrush risk during underground mining. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30(4), 2289-2295. DOI: 10.3233/IFS-151998
26. Pérez, J., Jimeno, J. L., & Mokotoff, E. (2006). Another potential shortcoming of AHP. *Top*, 14, 99-111. <https://doi.org/10.1007/BF02579004>
27. Paravarzar, S., Pourrahimian, Y., Askari-Nasab, H., & Emery, X. (2021). Short-term underground mine planning: a review. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 12(1), 1-33. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2021.114902>
28. Reinhart, R., Dang, T., Hand, E., Papachristos, C., & Alexis, K. (2020, May). Learning-based path planning for autonomous exploration of subterranean environments. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 1215-1221). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196662>
29. Li, S., Huang, Q., Hu, B., Pan, J., Chen, J., Yang, J., & Yu, H. (2023). Mining method optimization of difficult-to-mine complicated orebody using Pythagorean fuzzy sets and TOPSIS method. *Sustainability*, 15(4), 3692. <https://doi.org/10.3390/su15043692>
30. Erdogan, G., & Yavuz, M. (2017, December). Application of Three Existing Stope Boundary Optimisation Methods in an Operating Underground Mine. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 95, No. 4, p. 042077). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/95/4/042077

31. Brazil, M., & Grossman, P. (2008, September). Access layout optimization for underground mines. In *Australian Mining Technology Conference, Queensland*, 119-128.
32. Emdini Gliwan, S., & Crowe, K. (2022). A Network Flow Model for Operational Planning in an Underground Gold Mine. *Mining*, 2(4), 712-724. <https://doi.org/10.3390/mining2040039>
33. Bellman, R.E. (2010). *Dynamic programming*. Princeton university press. <https://doi.org/10.1515/9781400835386>
34. Burfield, C. (2013). *Floyd-Warshall algorithm*. Massachusetts Institute of Technology.
35. Weber, A., Kreuzer, M., & Knoll, A. (2020, May). A generalized Bellman-Ford algorithm for application in symbolic optimal control. In *2020 European Control Conference (ECC) (pp. 2007-2014)*. IEEE. <https://doi.org/10.23919/ECC51009.2020.9143743>
36. Broumi, S., Bakal, A., Talea, M., Smarandache, F., & Vladareanu, L. (2016, November). Applying Dijkstra algorithm for solving neutrosophic shortest path problem. In *2016 International conference on advanced mechatronic systems (ICAMechS) (pp. 412-416)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAMechS.2016.7813483>
37. Khorolskyi, A.O. (2021). Naukovi osnovy obgruntuvannya mezh oblasti ratsionalnoho proiektuvannya pry vidpratsiuvanni rodovyshch korisnykh kopalyn. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornoho proyzvodstva*, (23), 149-173. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.011>
38. Khorolskyi, A.O. (2022). Rezul'taty doslidzhen' iz rozrobky systemy pidtrymky pryynyattya rishen' dlya proyektuvannya protsesiv osvoyennya rodovyshch korisnykh kopalyn. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 2(51), 122-135. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-122-135> (in Ukrainian)
39. Hrinov V.H., Khorolskyi A.O. (2022). Vyznachennya dotsil'nosti vidpratsyuvannya rodovyshch na stadiyi peredproyektnykh doslidzhen' ratsional'noyi stratehiyi yikh osvoyennya. *Mineralni resursy Ukrainy*, №2, pp. 12-17. <https://doi.org/10.31996/mru.2022.2.12-17>
40. Khorolskyi A.O. (2023). Proyektuvannya protsesiv osvoyennya rodovyshch korisnykh kopalyn na osnovi doslidzhennya zminy stanu zapasiv. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya «Hirnycho-heolohichna»*, 1(29), 83-97. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-1\(29\)-83-97](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-1(29)-83-97)

## ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета.** Розробити новий підхід, щодо проектування процесів, які супроводжують освоєння родовищ корисних копалин. Це дозволить врахувати багатоманіття та різний ступінь впливу параметрів на загальну ефективність.

**Методи дослідження.** Застосовано декомпозиційний підхід для оптимізації багатопараметричних процесів гірничого виробництва. Мережеві моделі та алгоритми оптимізації на мережах та графах для пошуку оптимальної стратегії освоєння родовищ корисних копалин. Модель дослідження зміни стану запасів для проектування технологічних процесів, які супроводжують видобуток корисних копалин.

**Результати.** Було запропоновано методику оптимізації параметрів освоєння родовищ корисних копалин на основі представлення альтернативних варіантів технологічних процесів у вигляді мережевої моделі. В залежності від типу корисної копалини, а також доцільності збагачення відходів видобутку запропоновано дві стратегії проектування. Якщо відходи доцільно збагачувати, то необхідно максимізувати вартість тони гірської маси. Якщо відходи

видобутку недоцільно збагачувати, то необхідно мінімізувати витрати на видобуток тони корисної копалини. Для підвищення ефективності експлуатації рудних родовищ корисних копалин запропоновано застосовувати відходи видобутку у якості складових сумішей для закладки виробленого простору. Обсяги робіт із закладки виробленого простору визначаються на основі маржинального аналізу. Для підвищення ефективності експлуатації вугільних родовищ запропоновано мінімізувати кількість відходів, які надходять на поверхню. Було розглянуто альтернативні варіанти експлуатації вугільного родовища та запропоновано дві стратегії: одна полягає у мінімізації відходів, що передбачає селективне виймання і закладку виробленого простору, а інша стратегія полягає у максимізації вилучення супутніх корисних копалин, що передбачає комбайнове виймання, розділення вантажопотоків, додаткове збагачення відходів.

**Наукова новизна.** Наукова новизна полягає у розробці нового підходу, а також створенні моделей освоєння родовищ корисних копалин. Наведено алгоритм проектування процес освоєння родовищ корисних копалин. Якщо відходи видобутку недоцільно збагачувати то застосовуємо програмування альтернативного графу на мінімум, що дозволить мінімізувати вартість видобутку 1 т корисної копалини, у іншому випадку – програмування альтернативного графу на максимум, що дозволить максимізувати вартість 1 т гірничої маси. Виконання цих умов дозволить підвищити ефективність виробництва та знизити техногенне навантаження на довкілля.

**Практичне значення.** Полягає у створенні пакету прикладних програм для проектування процесів освоєння родовищ корисних копалин.

**Ключові слова:** стратегія, відходи виробництва, проектування, екологія, технологічна схема, граф, програмне забезпечення.

## **ABOUT AUTHORS**

Khorolskyi Andrii, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of laboratory, Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics the National Academy of Sciences of Ukraine (BPMP IGTM, NAS of Ukraine), 15 Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: andreykh918@gmail.com