

УДК 622.22.553.4:519.85

doi <https://doi.org/10.31996/mru.2019.2.46-50>

В. Г. ГРІНЬОВ, д-р техн. наук, професор, завідувач лабораторії проблем розробки родовищ корисних копалин Інституту фізики гірничих процесів Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0003-2942-6518>,

А. О. ХОРОЛЬСЬКИЙ, канд. техн. наук, науковий співробітник відділу Управління станом гірничого масиву Інституту фізики гірничих процесів Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0002-4703-7228>,

О. П. КАЛІУЩЕНКО, заступник директора із загальних питань Інституту фізики гірничих процесів Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0003-1077-0407>

V. HRINOV, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory of problems of working mine (Institute of Physics of the Mining Processes of National Academy of Sciences of Ukraine), <https://orcid.org/0000-0003-2942-6518>,

A. KHOROLSKYI, Candidate of Technical Sciences, Researcher of Department of management of mountain range the state (Institute of Physics of the Mining Processes of National Academy of Sciences of Ukraine), <https://orcid.org/0000-0002-4703-7228>,

O. KALIUSHCHENKO, Deputy Director General (Institute of Physics of the Mining Processes of National Academy of Sciences of Ukraine), <https://orcid.org/0000-0003-1077-0407>

РОЗРОБЛЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ СЦЕНАРІЇВ ЕФЕКТИВНОГО ОСВОЄННЯ ЦІННИХ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

ELABORATION OF ENVIRONMENTAL SCENARIOS FOR THE EFFECTIVE DEVELOPMENT OF VALUABLE MINERAL DEPOSITS

Мета цієї праці полягає в демонстрації можливостей розроблення економічних та екологічних сценаріїв розвитку територій із забруднювальним виробництвом. Установлено, що для планування ефективного освоєння родовищ, незалежно від виду корисної копалини, може бути запропонована модель зміни стану запасів копалини від балансових до кінцевої продукції. Альтернативні оптимальні варіанти сценаріїв освоєння запасів родовища корисної копалини показано на прикладі аналізу показників реального невеликого золоторудного родовища, обґрунтовано вартість екологічно безпечного виробництва кінцевої продукції під час видобутку золотоносної руди.

Ключові слова: сценарій освоєння, цінні родовища, екологія, раціональне природокористування, оптимальна стратегія, динамічне програмування, комп'ютерні програми.

The aim of this paper is to develop and validate methods of choosing the means of valuable mineral deposits. This paper describes a methodology for assessing deposits from both an economic and an environmental point of view. This article analyses existing methods of optimizing processes in mining. It is necessary to carry out not only economic but also environmental assessment. It was established that the effectiveness of the performance map of valuable mineral deposits is formed by a group of technological, ecological, operational, and environmental assessment which can be represented as a vector of solutions. To find the optimal solution, it was suggested to use network models and graphs. The essence of the technique is to represent the input and output (production level, prime cost) resource flows in an organized structure. Regularities of forming technological schemes of valuable mineral deposits operation with a given level of performance, taking into account the relationship between technological parameters of mineral deposits, operational parameters of the ecological parameter's, equipment, technical and economic performance are defined. We developed the system for decision-making support, which allows optimizing operational parameters, reducing the production prime cost, and selecting the structure of the production cycle with a specified level of performance. This paper describes approaches that can be used at the design stage of valuable mineral deposits and in the process of operation.

Keywords: development scenario, valuable mineral deposits, ecology, rational use of natural resources, optimal strategy, dynamic programming, software.

Вступ. Наша незалежна держава має багаті надра, які, зокрема, містять понад два десятки видів корисних копалин, що мають велике значення для економіки країни. Але стратегічної сировини в Україні, зокрема рідкісних і благородних металів, нині не добувають. Тож на сучасному етапі розвитку держави цьому питанню треба надати належної уваги.

Найбільші запаси золота розміщені в родовищах Закарпатської (Мужіївське), Кіровоградської (Клинцівське, Юріївське), Одеської (Майське) і Дніпропетровської областей (Сергіївське, Балка золота, Балка широка). Проте на сьогодні жодне із цих родовищ з різних причин не освоєне належним чином. Запаси золота в країні є, а їхнього ефективного освоєння немає.

Водночас на тлі кризи в золотодобуванні геологи отримують позитивні результати в оцінці нових родовищ золота та наголошують на перспективності подальших геологорозвідувальних робіт у Рахівському рудному районі. Таким чином, дослідження в напрямі розв'язання проблем ефективного видобутку з надр цінних корисних копалин є дуже актуальними.

Зазначимо, що ефективне освоєння цінних родовищ корисних копалин обов'язково має враховувати можливі варіанти економічних та екологічних сценаріїв розвитку територій, адже, окрім оцінки доцільності застосування технології, треба зважати на вплив на довкілля. Застосування еколого-економічної оцінки через побудову сценаріїв освоєння родовищ забезпечує раціональне природокористування.

Особливістю ефективного освоєння запасів рідкісних і благородних металів є потреба організації раціональної експлуатації рудних родовищ на засадах вирішення багатьох питань, не пов'язаних безпосередньо з гірничими роботами. Для освоєння родовищ корисних копалин з найменшими витратами, мінімально можливим збитком і максимальним прибутком потрібна узгоджена взаємодія в межах екологічних норм будівництва, видобутку, транспортування і перероблення як ланок однієї системи, яка працює на кінцевий результат у вигляді ринкового товару.

Усі особливості такої системи можна зобразити в моделі стану запасів родовища під час його експлуатації. Оцінити її зробити вибір у різних гірничо-геологічних, територіальних

і соціальних умовах з огляду на велике різноманіття форм рудних тіл і високу цінність корисної копалини можна на основі динамічного програмування [8]. Перший досвід вирішення завдань з вибору оптимальних стратегій освоєння родовищ рідкісних і благородних металів на основі динамічного програмування описано в праці автора цієї статті [2], яка нострифікована в Україні 2002 року.

Основні дослідження і публікації. Під час моделювання зміни стану запасів родовища на кожному етапі виробничого процесу треба ухвалювати оптимальне рішення щодо обґрунтування раціональних параметрів експлуатації, які полягають не тільки в зменшенні собівартості видобутку, але й мінімізації негативного впливу на довкілля.

Нині для ухвалення рішень щодо вибору оптимальної стратегії освоєння родовищ застосовують неформальні (евристичні методи), такі як АНР [7], його різновиди Fuzzy-АНР [14], TOPSIS [17], TODIM [9], PROMETHEE [20], ELECTRE, VI-KOR [18] та кількісні методи: динамічне програмування [16], критерії ухвалення рішень в умовах невизначеності [12], лінійне програмування [11], імітаційне моделювання [10], теорію ігор [6]. Водночас застосування неформальних методів [7, 9, 14, 17, 18, 20] ґрунтується на порівнянні альтернатив (за допомогою формальних оцінок “переваг”) між собою для визначення найбільш “впливового” критерію, який треба оптимізувати. Тобто внаслідок проведеного аналізу дістають розподіл критеріїв за рівнем впливу на кінцевий результат, але є ймовірність вибору неефективних рішень, адже ефективність залежить від досвіду проектувальника. Тому, на наше переконання, варто застосовувати кількісні методи [6, 10–12, 16], які дають змогу ухвалити єдине оптимальне рішення та не залежать від досвіду проектувальника. Окрім цього, в умовах систематичного недофінансування галузі першочерговими мають бути завдання, пов’язані зі стабілізацією та поступовим збільшенням обсягів видобутку, що без зменшення собівартості неможливо. Також під час розроблення золоторудних родовищ ідеться про техногенний вплив на довкілля, до того ж добувне виробництво може розмиватися в районах, цінних з погляду біологічного різноманіття, рекреаційних зонах, тому лише комплексна оцінка дасть змогу ухвалити рішення про доцільність видобутку. Варто зазначити, що екологічному аспекту освоєння родовищ присвячено низку праць [13, 15, 19], однак родовища оцінюють за рівнем негативного впливу вже в процесі розроблення, коли можна лише мінімізувати шкоду.

Репрезентована праця відрізняється від праць інших авторів [6, 7, 9–20] тим, що в ній запропоновано комплексний підхід щодо освоєння родовищ. Ідея полягає в представленні структури виробничого процесу у вигляді мережевої моделі, яка зображує етапи розроблення родовищ – від пошуку до списання запасів з балансу. Застосування методів динамічного програмування дає змогу отримати оптимальне рішення на кожному з етапів, водночас пошук може відбуватися як в прямому порядку (від пошуку до отримання продукції та списання запасів), так і у зворотному. Заслугує на увагу і той факт, що, окрім економічного сценарію, будується й екологічний. Таким чином, розроблення наукових основ раціоналізації параметрів розроблення родовищ є актуальним науково-практичним завданням.

Формулювання мети. Мета роботи полягає в розробленні підходів з раціоналізації параметрів розроблення цінних родовищ корисних копалин України щодо мінімізації собівартості видобутку та негативного впливу на довкілля. Ідея полягає в зображенні структури родовища та етапів його освоєння у вигляді декомпозиційної системи з формалізаці-

єю завдань на кожному з етапів. Для ухвалення оптимальних рішень застосовано алгоритми динамічного програмування.

Динамічне програмування дає змогу вирішувати завдання, які виникають під час оптимізації, у набагато коротші терміни, ніж поваріантні розрахунки. Логічною основою методу є принцип оптимуму Р. Беллмана [1] про те, що рішення, яке ухвалюється на кожному етапі, має бути найліпшим стосовно процесу загалом. Незалежно від передісторії процесу, його станів і рішень, ухвалених раніше, усі рішення, котрі впливають на подальші етапи, з погляду цього етапу мають бути оптимальними. Під час розподілу процесу на етапи обов’язковою умовою є заборона на переривання матеріального потоку. Кажучи іншими словами, початковий стан матеріалів на певному етапі має точно відповідати кінцевому стану попереднього етапу. Тож будь-яка зміна має відбуватися в межах певного етапу, а не в проміжку між ними.

Викладення основного змісту. Перш ніж ухвалювати конкретні технічні рішення, проектувати й запроваджувати будь-які технології з видобутку й перероблення корисних копалин, треба зіставити й проаналізувати можливості розробника та показники родовища. З одного боку, власник як суб’єкт права на користування надрами окреслює можливості з фінансування трудових і матеріальних ресурсів. З іншого боку, проводиться аналіз об’єкта розроблення щодо цінності вилученої з надр сировини, ступеня освоєння території, можливості перероблення і збуту продукції. На цьому матеріалі можна обґрунтувати формат простору проектування з параметрами, які можуть забезпечити раціональну експлуатацію родовища.

Запропонований підхід до планування ефективного освоєння родовищ можна застосовувати незалежно від виду корисної копалини. У цьому сенсі найпоказовішими є результати досліджень проблем експлуатації родовищ під час вилучення з надр особливо цінних корисних копалин [3, 5].

Отже, процес за весь період освоєння конкретного родовища треба уявити у вигляді декомпозиційної системи з формалізацією завдань на окремих етапах зміни стану запасів корисних копалин від балансів до добутих з подальшим списанням запасів з балансу.

Модель такого процесу може бути побудована у вигляді альтернативного графа, в якому логічно пов’язані варіанти спорудження та експлуатації об’єктів енергопостачання, транспорту, побутового, поверхневого й підземного комплексів гірничозбагачувального підприємства з видобутку. Дуги графа представлені числовими значеннями витрат або формалізацією виробничих процесів керівними параметрами. На рис. 1 зображений граф з 37 вузлами. Кожна дуга (i, j) має свою довжину t_{ij} . У спрямованому ациклічному графові можна помітити вузли цілими числами від 1 до N у такий спосіб, що для кожної дуги (i, j) справедлива нерівність $(i < j)$.

Пошук оптимального рішення полягає у знаходженні найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла 37. Нехай f_i – довжина найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла i , тоді $f_i = 0$. З визначення f_i також випливає, що $f_i + t_{ij}$ – довжина найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла j за умови, що останньою дугою шляху є дуга (i, j) .

Обов’язкова умова динамічного програмування – безперервність процесу, що оптимізується, тому в цьому разі прийнято поетапну зміну стану проектних балансів запасів. Освоєння золоторудного родовища охоплює щонайменше дванадцять етапів [2], які представлені графом на рис. 1: записи затвержені й передані на баланс підприємства; запаси в стані забезпеченості трудовими ресурсами; запаси в стані

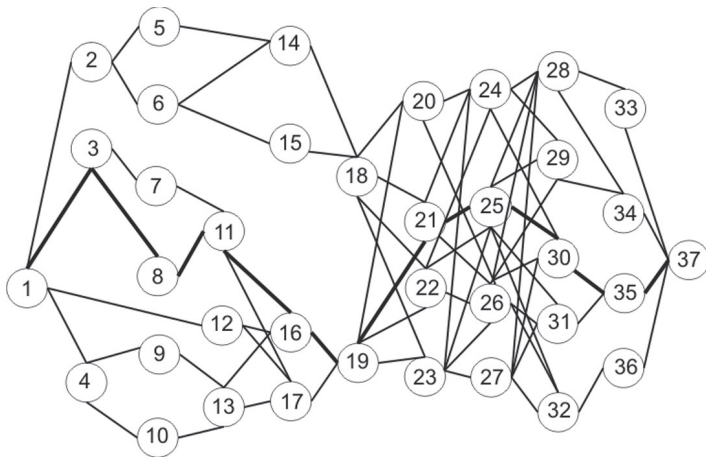


Рис. 1. Альтернативний граф визначення стратегії освоєння золоторудного родовища. 1–37 – вузли

забезпеченості транспортним сполученням; запаси в стані забезпеченості непромисловими об'єктами; запаси в стані енергоозброєності; запаси в стані забезпеченості промисловими об'єктами; запаси в стані розкриття; запаси в стані вилучення з надр; запаси в стані переміщення; запаси в стані перероблення на збагачувальній фабриці; запаси в стані металу (концентрат); запаси, списані з балансу.

Сенс логічних переміщень описаний табличним варіантом у праці [3] у вигляді витрат на виконання альтернативних процесів з моменту затвердження й передання запасів на баланс підприємства до списання запасів з балансу. Найкоротший шлях від вузла 1 до вузла j має містити деяку дугу як кінцеву і тому [5]

$$f_i = \min_{i(i,j)} (f_i + t_{ij}). \quad (1)$$

Якщо дуга виходить з вузла i та входить у вузол j , то її позначають як (i, j) . Для всіх дуг, що входять у вузол j , має місце нерівність $(i < j)$. Це означає, що вираз (1) використовують для обчислень f_i при $j=2, 3, \dots, 37$. Замість того, щоб розв'язувати задачу безпосередньо, її було розв'язано в категорії завдань про найкоротший шлях, а саме обчислення f_i для усіх j . Така особливість характерна фактично для кожної моделі багатокрокового процесу.

З оптимізацією моделі освоєння родовища, окрім принципу оптимуму Р. Беллмана, потрібно виконувати додаткові вимоги:

- під час переходу з етапу на етап треба враховувати тільки зв'язки – поєднання логічно або технологічно сумісних реальних варіантів;

- на всіх етапах процесу отримання кінцевої продукції діють параметри, які встановлює одне відомство.

Принцип оптимальності для нашого завдання: підшлях найкоротшого шляху сам є найкоротшим шляхом. Універсальніший варіант принципу охоплює поняття стратегії.

Стратегія визначає дугу (i, j) , що входить у кожний з вузлів j , окрім першого ($j=1$), є безліч стратегій для цієї ациклічної мережі. Стратегію називають оптимальною для вузла j , якщо вона виявляє дуги, які утворюють найкоротший шлях від вузла 1 до вузла j . Оптимальна стратегія характеризує оптимальний сценарій освоєння родовища. На графі рис. 1, що описує процес освоєння конкретного золоторудного родовища [4], оптимальний шлях найліпших варіантів на всіх етапах зміни стану запасів виділений стовпцевою лінією: 1–3–8–11–16–19–21–25–30–35–37.

У праці [4] на прикладі оцінки родовищ рідкісних і благородних металів рекомендовано порядок техніко-економічного обґрунтування залучення до розроблення родовищ

корисних копалин. Алгоритм розрахунків із залученням спеціалізованих комп'ютерних програм такий:

- визначають техніко-економічні показники видобутку руди в цих умовах;

- за розрахунковими показниками експлуатації родовищ і середньої по гірничозбагачувальному комбінату собівартості видобутку, транспортування й перероблення руди визначають кадастрову цінність родовища, що виражається сумою коштів, банківський відсоток з яких за рік становить дохід величиною з очікуваний від розроблення родовища річний прибуток з урахуванням відсотків за кредит і встановленої плати за фонди;

- з отриманих пріоритетів щодо кадастрової цінності та можливих варіантів ухвалення рішень на етапах освоєння родовищ будують альтернативні графи визначення стратегій освоєння конкретних родовищ;

- розраховують значення дуг в альтернативних графах;

- за спеціалізованими програмами динамічного програмування на максимум і мінімум виявляють оптимальні способи і стратегії, які відповідають оптимальним витратам на видобуток, транспортування й перероблення сировини під час освоєння родовищ;

- перераховують кадастрову цінність родовища з огляду на оптимізацію повної собівартості 1 т руди і визначають порядок залучення до експлуатації цих родовищ.

Запропонований підхід дає змогу обґрунтовувати сферу ефективної експлуатації з боку альтернативних розробників з різними правами на користування надрами й різними фінансовими можливостями, трудовими та матеріальними ресурсами, а також проводити геолого-економічну переоцінку запасів родовищ, перспективних для інвестицій. Завдяки багатократним варіантним розрахункам можна обґрунтувати зміну кондицій.

Нині в цивілізованих країнах усе частіше як головний критерій для ухвалення рішень під час освоєння ресурсів надр на перше місце виходить екологічний аспект. Потенціал розвитку досліджень у напрямі оптимізації мережевих моделей достатній для економічної оцінки екологічного аспекту освоєння родовищ корисних копалин. Процедура такої оцінки полягає у фінансовому порівнянні двох сценаріїв освоєння – оптимального з економічного погляду та екологічно безпечного. Реалізувати процедуру порівняння цих варіантів можна буде на базі методології моделювання процесу освоєння родовища на всіх етапах отримання кінцевої продукції за економічними показниками (мінімальна собівартість, прибуток) і моделювання процесу освоєння родовища з огляду на екологічні переваги на всіх етапах розроблення і збагачення копалини.

Як ілюстрації альтернативних оптимальних варіантів економічного та екологічного сценаріїв освоєння запасів родовища корисної копалини показані приклади аналізу показників освоєння реального невеликого золоторудного родовища, які наведені в праці [4]. Увесь процес освоєння невеликого золоторудного родовища був розбитий на етапи: енергопостачання, транспортне сполучення, забезпечення промисловими об'єктами, видобуток, транспорт і збагачення руди. На рис. 2 представлений альтернативний граф сценарію освоєння такого родовища з 12 вершинами і 18 дугами.

Вхідні дані для пошуку найкоротшого шляху в спрямованому ациклічному графі складаються з переліку початкових вершин П, кінцевих – JJ і елементів підмножини Т (значень дуг у вигляді витрат в умовних одиницях на 1 т видобутку, транспортування і перероблення) множини SS: П – JJ – Т; 2 – 1 – 69,00; 3 – 1 – 88,21; 4 – 1 – 88,21; 5 – 2 – 55,17; 5 – 3 – 72,1; 5 – 4 – 41,57; 6 – 5 – 70,00; 7 – 6 – 3,90; 8 – 6 – 3,90; 9 – 6 – 3,90; 10 – 7 – 0,36; 10 – 8 – 0,03; 10 – 9 – 0,27; 11 – 7 – 0,36; 11 – 8 – 0,03;

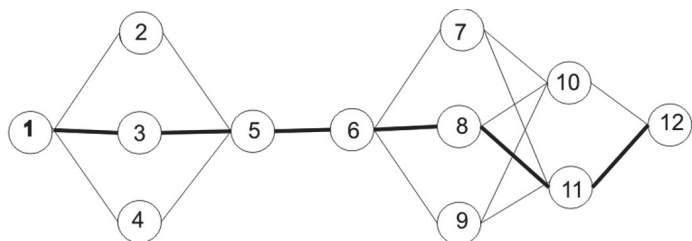


Рис. 2. Альтернативний граф визначення економічної стратегії освоєння невеликого золоторудного родовища. 1–12 – вузли 11 – 9 – 0,27; 12 – 10 – 45,23; 12 – 11 – 4,03. Результати розрахунку наведено на рис. 3.

Оптимальний шлях: 1-3-5-6-8-11-12, на рис. 3 виділений стовщеною лінією. Довжина маршруту становить 173,63 у. о.

Як приклад побудови альтернативного варіанта сценарію освоєння запасів невеликого родовища золота на рис. 4 наведений граф визначення екологічної стратегії освоєння раніше запропонованого родовища.

Представлений граф відрізняється від опублікованих раніше варіантів графічних сценаріїв, по-перше, додатковим етапом, який утілюється після затвердження запасів і передання їх на баланс підприємства, а в сучасних українських умовах після надання спеціальних дозволів на користування надрами за результатами аукціонних торгів. У разі їхнього надання без проведення аукціону визначальною є початкова ціна продажу такого дозволу, яку розраховують згідно з вартістю запасів і ресурсів корисних копалин або ділянок надр відповідно до чинних нормативів.

По-друге, вершини графа на всіх етапах освоєння родовища марковані відповідно до екологічної переваги з погляду незалежної експертизи. Оцінку екологічних переваг демонструє зміна кольору вузлів графа відповідно до рейтингу барв веселки (червоний, помаранчевий, жовтий, зелений).

Новий етап 0-1 процесу освоєння запасів родовища характеризується додатковою процедурою зміни стану запасів, яка охоплює попереднє моделювання всього сценарію освоєння родовища від початку до отримання кінцевого продукту для аналізу пріоритетів з кадастрової цінності та можливих варіантів ухвалення рішень на етапах освоєння, зокрема з огляду на екологічні переваги.

Оптимальний шлях другого варіанта: 0–1а–3–5–6–7–10–12, на рис. 4 виділений стовщеною лінією. Довжина маршруту становить 10,74+214,95=225,69 у. о. Альтернативний варіант освоєння родовища відрізняється, окрім додаткового нульового етапу, ще переробленням сировини на новій збагачувальній фабриці з повним виконанням екологічних нормативів. Фінансова різниця між економічним та екологічним сценаріями становить 52,06 у. о. витрат на 1 т видобутку, транспортування і перероблення.

JJ	II	T	Min	Fi
2	1	69.00	0.00	69.00
3	1	88.21	0.00	88.21
4	1	88.21	0.00	88.21
5	2	55.17	69.00	122.38
5	3	7.21	88.21	95.67
5	4	41.57	88.21	129.70
6	5	70.00	95.67	165.67
7	6	3.90	165.67	169.57
8	6	3.90	165.67	169.57
9	6	3.90	165.67	169.57
10	7	0.36	169.57	169.57
10	8	0.03	3.90	173.47
10	9	0.27	0.27	173.70
11	7	0.36	169.57	169.57
11	8	0.03	3.90	173.47
11	9	0.27	0.27	173.70
12	10	45.23	169.60	214.83
12	11	4.03	169.60	173.73

Рис. 3. Результати розрахунків процесу пошуку економічної стратегії освоєння родовища

Нині в Інституті фізики гірничих процесів НАН України розробляють програмне забезпечення щодо втілення алгоритмів динамічного програмування на мережевих моделях. Створено прототип, який реалізує алгоритм Беллмана-Форда за допомогою команд (рис. 5), надалі буде створено візуалізатор і систему звітів.

Під час вибору варіанта освоєння родовища проводять як економічну, так і екологічну оцінку. Водночас не завжди оптимальна альтернатива з погляду собівартості готової продукції або продуктивності може бути ліпшою з погляду екології. Перевагу варто віддавати безпечнішій технології, тому що завжди можливі сценарії, за яких попит на корисні копалини падатиме.

Подання можливих варіантів відпрацювання родовищ у вигляді мережевої моделі дає змогу в наочному й компактному вигляді представити інформацію про характеристики родовища, технологічний цикл отримання кінцевої продукції, витрати на отримання кінцевої продукції, а запропоновані засоби підтримки ухвалення рішень у вигляді програмного забезпечення дають змогу підвищити розмірність задач, зва-

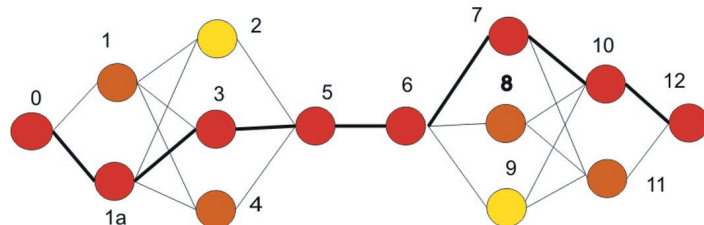


Рис. 4. Альтернативний граф визначення екологічної стратегії освоєння невеликого золоторудного родовища. 0–12 – вузли

```
File Edit Shell Debug Options Window Help
Distance to 9: inf
Distance to 10: inf
Distance to 11: inf
Distance to 12: inf

What would you like to do? bellman-ford12
What would you like to do? bellman-ford12
Distances from 12:
Distance to 1: 213
Distance to 2: 175
Distance to 3: 125
Distance to 4: 162
Distance to 5: 120
Distance to 6: 50
Distance to 7: 47
Distance to 8: 46
Distance to 9: inf
Distance to 10: 45
Distance to 11: 4
Distance to 12: 0

What would you like to do? display
Vertices: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Edges:
(src=2, dest=1, weight=69)
(src=3, dest=1, weight=88)
(src=4, dest=1, weight=88)
(src=5, dest=2, weight=55)
(src=5, dest=3, weight=5)
(src=5, dest=4, weight=42)
(src=6, dest=5, weight=70)
(src=7, dest=6, weight=4)
(src=8, dest=6, weight=4)
(src=9, dest=6, weight=4)
(src=10, dest=7, weight=2)
(src=10, dest=8, weight=1)
(src=12, dest=10, weight=45)
(src=12, dest=11, weight=4) |
```

Рис. 5. Фрагмент програми реалізації алгоритму Беллмана-Форда

жаючи на детермінований характер формування рівня продуктивності.

Висновки. Унаслідок дослідження запропоновано новий спосіб розроблення екологічних сценаріїв розвитку територій, який полягає в оптимізації мережевих моделей, що відповідають екологічним стратегіям освоєння родовищ корисних копалин з огляду на вироблення кінцевої продукції. Для цього розроблено модель зміни стану запасів родовища від стадії розвідки до списання запасів з балансу, а також проведено економічну оцінку, зважаючи на екологічний аспект освоєння родовищ. На відміну від економічних сценаріїв освоєння родовища врахування екологічних вимог передбачає рейтингову оцінку техногенної небезпеки для довкілля кожного етапу, що дає змогу оцінити не тільки зиск, але й ризики виробництва. Алгоритмічний опис процесу керування станом запасів родовищ та форма представлення результатів дають змогу запровадити описані методи у виробництво, водночас родовище розглянуто не як окремий об'єкт, а як проміжну ланку в процесі отримання кінцевої продукції. Крім того, послідовність пошуку оптимального рішення можна розглядати як від початку освоєння родовища до стадії отримання кінцевої продукції, так і у зворотному напрямку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965.
2. Гринева В. Г. Оценка и выбор рациональных параметров подземной разработки рудных месторождений Якутии. Автореф. ... докт. техн. наук. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 1993. – 43 с.
3. Гринева В. Г. Решение проблем разработки рудных месторождений Севера. – Новосибирск: ВО "Наука", 1992. – 205 с.
4. Гринева В. Г., Изаксон В. Ю., Зубков В. П. Решение горных задач на ЭВМ при освоении рудных месторождений. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 215 с.
5. Шварц В. Динамическое программирование на примере оптимизации технологии выплавки медной руды/Пер. с нем./Erzmetall. – 1968. – № 10.
6. Amankwah H. Mathematical Optimization Models and Methods for Open-Pit Mining. 2011. Ph.D. Linköping University.
7. Ataei M., Jamshidi M., Sereshki F., Jalali I. S. M. E. Mining method selection by AHP approach. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2008, 108(12), 741–749.
8. Daskin M. S. Network and discrete location: models, algorithms, and applications. John Wiley & Sons, 2013, <https://doi.org/10.1002/9781118537015>.
9. Dehghani H., Siami A., Haghi P. A new model for mining method selection based on grey and TODIM methods. Journal of Mining & Environment. 2017, 8(1), 49–60, doi: 10.22044/jme.2016.626.
10. Fioroni M., Santos Letícia C., Franzese L., Seixas J., Penna B., Alkmim G. Logistic evaluation of an underground mine using simulation. Rem: Revista Escola de Minas, 2014. 67(4), 447–454. <https://dx.doi.org/10.1590/0370-44672014670181>.
11. Guang X., Jinxin H., Baisheng N., Chalmers D., Zhuoming Y. Calibration of Mine Ventilation Network Models Using the Non-Linear Optimization Algorithm. Energy, 2017, 31(11), 11–19, <https://doi.org/10.3390/en11010031>.
12. Hurwicz L. (1995). What is the Coase Theorem? Japan and the World Economy, 7(1), 49–74.
13. Imanberdieva N., Chukunkyzy N., Severoglu Z., Kulenbekov Z. Ecology and Environmental Aspects of "Makmalzoloto" Gold Mining Area in Kyrgyzstan. In: Vegetation of Central Asia and Environs. Springer, Cham, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99728-5_13.
14. Iphar M., Alpay S. A mobile application based on multi-criteria decision-making methods for underground mining method selection. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2018, 126(3), 69–77, <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1467655>.
15. Karabyn V., Shtain B., Popovych V. Thermal regimes of spontaneous firing coal washing waste sites. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical sciences, 2018, 429(3), 64–74.
16. Kellerer H., Pferschy U. and Pisinger D. Knapsack Problems – Springer Science+Business Media, 2004. 548 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-24777-7>.
17. Mikaeil R., Naghadehi M., Ataei M., Khalokakaie R. A decision support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and TOPSIS approaches for selection of the optimum underground mining method. Archives of Mining Sciences, 2009, 54(2), 349–368.
18. Opricovic S., Tzeng G.-H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. European Journal of Operational Research, 2007, 178(2), 514–529. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020>.
19. Starodub Y., Karabyn V., Havrys A., Shainoga I., Samberg A. Flood risk assessment of Chervonograd mining-industrial district. Proc. SPIE 10783, 107830P. Event SPIE. Remote Sensing, Berling, Germany (10 October 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2501928>.
20. Tzeng G., Huang J. Multiple attribute decision making: Methods and applications. 2011, Boca Raton, FL, USA: Chapman and Hall/CRC Press.

REFERENCES

1. Bellman R., Dreyfus S. Applied Dynamic Programming. – Moskva: Nauka, 1965. (In Russian).
2. Grinev V. G. Evaluation and selection of rational parameters of underground mining of ore deposits of Yakutia. Dr. tech. Science. – Novosibirsk: IGD SO RAN, 1993. – 43 p. (In Russian).
3. Grinev V. G. Solution of the problems of the development of ore deposits of the North. – Novosibirsk: Nauka, 1992. – 205 p. (In Russian).
4. Grinev V. G., Izakson V. Yu., Zubkov V. P. The solution of mountain problems on a computer during the development of ore deposits. – Novosibirsk: Nauka, Siberian Publishing Company of the Russian Academy of Sciences, 1999. – 215 p. (In Russian).
5. Shwarc V. Dynamic programming on the example of copper ore smelting technology optimization//Erzmetall. – 1968. – № 10. (In Russian).
6. Amankwah H. Mathematical Optimization Models and Methods for Open-Pit Mining. 2011. Ph.D. Linköping University.
7. Ataei M., Jamshidi M., Sereshki F., Jalali I. S. M. E. Mining method selection by AHP approach. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2008, 108(12), 741–749.
8. Daskin M. S. Network and discrete location: models, algorithms, and applications. John Wiley & Sons, 2013, <https://doi.org/10.1002/9781118537015>.
9. Dehghani H., Siami A., Haghi P. A new model for mining method selection based on grey and TODIM methods. Journal of Mining & Environment. 2017, 8(1), 49–60, doi: 10.22044/jme.2016.626.
10. Fioroni M., Santos Letícia C., Franzese L., Seixas J., Penna B., Alkmim G. Logistic evaluation of an underground mine using simulation. Rem: Revista Escola de Minas, 2014. 67(4), 447–454. <https://dx.doi.org/10.1590/0370-44672014670181>.
11. Guang X., Jinxin H., Baisheng N., Chalmers D., Zhuoming Y. Calibration of Mine Ventilation Network Models Using the Non-Linear Optimization Algorithm. Energy, 2017, 31(11), 11–19, <https://doi.org/10.3390/en11010031>.
12. Hurwicz L. What is the Coase Theorem? Japan and the World Economy, 7(1), 1995. 49–74.
13. Imanberdieva N., Chukunkyzy N., Severoglu Z., Kulenbekov Z. Ecology and Environmental Aspects of "Makmalzoloto" Gold Mining Area in Kyrgyzstan. In: Vegetation of Central Asia and Environs. Springer, Cham, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99728-5_13.
14. Iphar M., Alpay S. A mobile application based on multi-criteria decision-making methods for underground mining method selection. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2018, 126(3), 69–77, <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1467655>.
15. Karabyn V., Shtain B., Popovych V. Thermal regimes of spontaneous firing coal washing waste sites. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical sciences, 2018, 429(3), 64–74.
16. Kellerer H., Pferschy U. and Pisinger D. Knapsack Problems – Springer Science+Business Media, 2004. 548 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-24777-7>.
17. Mikaeil R., Naghadehi M., Ataei M., Khalokakaie R. A decision support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and TOPSIS approaches for selection of the optimum underground mining method. Archives of Mining Sciences, 2009, 54(2), 349–368.
18. Opricovic S., Tzeng G.-H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. European Journal of Operational Research, 2007, 178(2), 514–529. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020>.
19. Starodub Y., Karabyn V., Havrys A., Shainoga I., Samberg A. Flood risk assessment of Chervonograd mining-industrial district. Proc. SPIE 10783, 107830P. Event SPIE. Remote Sensing, Berling, Germany (10 October 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2501928>.
20. Tzeng G., Huang J. Multiple attribute decision making: Methods and applications. 2011, Boca Raton, FL, USA: Chapman and Hall/CRC Press.

Рукопис отримано 4.04.2019.