

Раздел 4. Техніко-економічні проблеми горного виробництва

УДК 622.22.553.4:519.85

<https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.008>

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГІРНИЧОЗБАГАЧУВАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ОСВОЄННЯ ЦІННИХ РОДОВИЩ УКРАЇНИ

В.Г. Гріньов^{1*}, А.О. Хорольський¹,

¹Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України,
м. Дніпро, Україна

*Відповідальний автор: e-mail: grinevv@ukr.net

OPTIMAL DESIGN OF THE PARAMETERS OF MINING ENTERPRISES FOR FIELD DEVELOPMENT OF RARE AND PRECIOUS METALS

V.G. Hrinov^{1*}, A.A. Khorolskyi¹

¹Institute for Physics of Mining Processes the National Academy Sciences of
Ukraine, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: e-mail: grinevv@ukr.net

ABSTRACT

Purpose. To solve the problem of efficient development of rare and precious metals by creating optimal design technology and propose a new approach to the design of layout of ore deposits with reserves of rare and precious metals.

Methods. To model the process of development of a particular field used methods of dynamic programming, the choice of rational production volume made by comparing marginal costs and income and taking into account the environmental aspect of the development of the field. The paper presents numerous specifications of the development of valuable ore reserves, which can be displayed in a mathematical model of the state of reserves throughout the entire period operation of fields. Evaluate and make a choice in different geological, territorial and social conditions, taking into account the great variety of forms of ore bodies and high value of the mineral, possibly based on dynamic programming.

Findings. The results of modeling the strategy of development of gold deposits with a specialized program of dynamic programming, the calculations of the rational volume of metal production at the real field and an example of constructing an alternative version of the ecological strategy for the development of gold deposits are presented. Modern methods are described for determining the profitability of exploiting real reserves of gold field, which show the possibilities of efficient development of high-grade ore resources, as well as creating powerful anchor projects for building up our own mineral resources sector of Ukraine.

Originality. It has been a model of changes in the state of the balance reserves of home made fields is describes, taking into account the current and compulsive antecedents for dynamic programming. A method of optimizing the model is given and software calculations are recommended.

Practical implications. We developed the system for decision-making support, which allows optimizing operational parameters of layout of ore deposits with reserves of rare and precious metals.

Keywords: rare and precious metals, opening of a deposit, dynamic programming, inventory status, algorithm, software, optimization, effective operation, anchored project, investment attractiveness

1. ВСТУП

Надра нашої країни наділені багатством у виді десятків видів корисних копалин, у тому числі стратегічних корисних копалин – рідкісних і благородних металів. Потребу України в ефективній експлуатації своїх надр важко переоцінити, але жодне з цих родовищ навіть з часів незалежності не освоєне належним чином. Причини цього достатньо описані у ЗМІ та наукових виданнях [1, 2]. Така негативна реальність пояснюється, в першу чергу, браком уваги і державних ресурсів через бойові дії, що відбуваються на українській території, потім корупцією у відповідних структурах, а також не досить фаховим відношенням до складної науково-технічної проблеми ефективної розробки цінних родовищ з екологічно шкідливим виробництвом, які розташовані фактично в центрі Європи.

Технічно питання здавалося б вирішується просто. Є родовище корисної копалини, по якій проведена ГЕО (геолого-економічна оцінка) або в стандартному або комерційному варіантах з відповідно обґрунтованими кондиціями на мінеральну сировину і підрахованими запасами [3, 4]. ОПР (особа, що приймає рішення – власник ліцензії, інвестор) розглядає декілька варіантів отримання кінцевої продукції. Згідно з діючими нормативами [5, 6] під час визначення оптимального варіанту промислового освоєння оцінюваного геологічного об'єкту перевагу слід віддавати варіанту, що забезпечує максимальні величини накопиченого чистого грошового потоку і доходу держави, як власника надр при позитивному значенні чистого дисконтованого грошового потоку.

Обґрунтування способу і системи розробки родовища, виробничої потужності і терміну дії підприємства, видів гірничовидобувного обладнання, засобів механізації, інших проектних рішень і розрахункових параметрів слід проводити методами, які застосовуються в практиці проектування гірничодобувних підприємств, з використанням чинних галузевих норм технологічного проектування, державних будівельних норм, проектів діючих підприємств-аналогів, даних науково-технічних досліджень.

Сумарний ефект від кожного варіанту рекомендується підраховувати з використанням дійсних на момент оцінки цін, нормативів і досягнутих показників передових методів праці, новітньої техніки і прогресивної технології видобутку і переробки мінеральної сировини.

Проти таких рекомендацій важко заперечувати, проте слід зазначити наступне: таких аналогів розробки, наприклад, золоторудних родовищ немає ні в Україні, ні в Європі. Значний досвід і прогресивні технології вилучення з надр благородних металів існують на американському, азіатському і африканському континентах [7, 8, 9]. Інтегральний сумарний економічний ефект, за якими б цінами він не розраховувався (незмінним або поточними), і який би метод обліку чинника часу при цьому не застосовувався (активний або пасивний), є відносною величиною, що служить критерієм для вибору найкращого варіанту (з точки зору ОПР) для проекту освоєння родовища [10].

Підходи наведені в дослідженнях в цьому напрямі дискусійні, як спірне зараз питання про напрями розвитку в нашій країні економіки і виробництва. Ринкової економіки в чистому вигляді не існує і немає ніде у світі класичних моделей ринку: чистої конкуренції, монополії, монополістичної конкуренції і олігополії [11]. У цьому плані цікавий приклад невідповідності класиці в Україні, в якій виявляється є «олігархи» без олігополії. Виходить, що вони (олігархи) замість того, щоб таємно домовлятися один з одним між собою конкурують. У запропонованій роботі йдеться про дуже актуальні в нашій країні дослідження, які пов'язані з вирішенням проблем ефективного освоєння родовищ рідкісних і благородних металів.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Після проведення державної експертизи геологічних матеріалів та встановлення кондицій на мінеральну сировину проводиться робота по оцінці запасів і ресурсів на конкретному родовищі. Запаси корисних копалин і техніко-економічна оцінка ефективності їх розробки, що затвердила ДКЗ України (Державна комісія України по запасах корисних копалин) [12], є підставою для складання проектів експлуатації родовища та переходу до видобування корисних копалин. При цьому проект промислової розробки родовища має передбачати розробку повністю всіх запасів корисних копалин, які затверджено як економічно рентабельні промислові та надано в користування.

Кондиції, або граничні значення натуральних показників для підрахунку запасів, мають бути основою для проектування розробки родовища. Початкових даних, в які входять розроблені і затверджені в установленому порядку кондиції, а також значення показників промислового освоєння оцінюваного родовища і які були використані при обґрунтуванні цих кондицій, цілком достатньо для оптимального проектування параметрів гірничо-збагачувального підприємства (ГЗП) для раціонального освоєння цінних руд за наступних умов.

В першу чергу, при проектуванні великого ГЗП необхідно врахувати особливості ефективного освоєння запасів цінних металів, яка полягає в необхідності організації раціональної експлуатації рудних родовищ на базі вирішення багатьох питань, які не пов'язані безпосередньо з гірничими роботами [13]. Проектні параметри гірничо-збагачувального комбінату з етапами від балансових запасів до їх списання через складність системи практично неможливо описати однією цільовою функцією, тому для узгодженої взаємодії усіх ланок процесу виробництва кінцевої продукції при експлуатації родо-

вища корисної копалини необхідно застосовувати методики оптимізації у багатовимірному просторі. Якщо математичну модель освоєння родовища представити графами або мережами, то це значно спрощує її рішення завдяки класичним алгоритмам.

Вдруге, слід врахувати, що фундаментальним питанням в гірничій справі є розуміння – скільки і якої якості треба виробити продукції. У світовій практиці відомі два підходи до визначення раціонального обсягу виробництва, при якому підприємство може отримувати максимальні прибутки або мінімальні збитки. Перший підхід заснований на порівнянні валового доходу і валових витрат, при цьому фіксується момент і умови перевищення доходів над витратами. Такий підхід рекомендований в нормативному документі [6], у якому зазначено що «визначення виробничої потужності гірничодобувного підприємства належить проводити за методиками проектування, оснований на гірничих можливостях родовища (покладу), з оптимізацією за мінімумом собівартості видобутку корисних копалин». При цьому допускається обмеження виробничої потужності підприємства при наявності зовнішніх обмежень комерційного, екологічного або іншого характеру (потреба сировини, переробка, енергія, транспорт, водних, матеріальних і інших ресурсів, технічне завдання користувача надр). Фактично такі додаткові умови зводять нанівець рекомендації по оптимізації по мінімуму собівартості видобутку.

Альтернативним і прогресивнішим підходом є визначення раціонального обсягу виробництва шляхом порівняння сум, які кожна додаткова одиниця продукції додаватиме до валового доходу, з одного боку, і до валових витрат з іншого [11]. При цьому слід порівнювати граничний дохід MR (marginal return) і граничні витрати MC (marginal cost) кожної подальшої одиниці продукції. Ключ до правила що визначає раціональний обсяг виробництва – визначення точки рівності MR и MC.

Оскільки це правило є точним орієнтиром максимізації прибутку або мінімізації збитків для усіх фірм, незалежно від того чи являються вони чисто конкурентними або монополістично конкурентними, то в сучасних умовах проектувати технологічні параметри експлуатації конкретного родовища слід, виходячи з обсягу виробництва продукції, в прив'язці до діапазону рівноважних граничних витрат і доходів [10, 14].

В третє, зараз в цивілізованих країнах, все частіше, в якості головного критерію для ухвалення рішень при освоєнні ресурсів надр на перше місце виходить екологічний аспект. Процедура такої оцінки полягає у фінансовому порівнянні двох сценаріїв освоєння – оптимального з економічної точки зору та екологічно переважним. Реалізувати процедуру порівняння цих варіантів можна буде на базі методології моделювання процесу освоєння родовища на усіх етапах отримання кінцевої продукції за економічними показниками (мінімальна собівартість, прибуток) і моделювання процесу освоєння родовища з урахуванням екологічних переваг на усіх етапах розробки і збагачення копалини [2].

Таким чином, перш ніж займатися розробкою технічних рішень, конкретним проектуванням і впровадженням тієї або іншої технології видобутку і переробки корисної копалини, необхідно проводити зіставлення і аналіз мо-

жливостей розробника і показників родовища. З одного боку виступає суб'єкт в ролі власника ліцензії з правом на користування надрами з його фінансовими можливостями, трудовими і матеріальними ресурсами. З іншого боку аналізується об'єкт розробки – вилучена цінність родовища з надр, міра освоєння території, можливість збагачення і збуту продукції. На цьому матеріалі, використовуючи відомі критерії ефективності і методи оптимізації, можна обґрунтувати простір проектування – область, визначену усіма проектними параметрами, які можуть забезпечити раціональну експлуатацію родовища.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Модель освоєння родовища. Раціональне освоєння родовища це оптимальне рішення не окремих етапів процесу на шляху отримання кінцевої продукції, а оптимізація експлуатації родовища. Це може бути досягнуто завдяки встановленню логічних зв'язків, а при розрахунках техніко-економічних показників, фактично, взаємозв'язків між усіма етапами освоєння родовища.

При цьому виникає багатогранність проблеми оптимізації через те, що кожен етап передає наступному етапу спектр найважливіших результатів і тим самим до нескінченності збільшує кількість варіантів, які необхідно перевірити на можливість оптимізації. У таких завданнях фактично не можна прорахувати усі варіанти і шляхом порівняння вибрати найкращу комбінацію [15].

У 70-і роки минулого століття співробітниками Принстонського університету був розроблений метод динамічного програмування [16, 17], який дозволив вирішувати завдання, які допускають розчленовування математичної моделі на окремі взаємозв'язані блоки і використання адитивного критерію. Тепер замість перебору варіантів може бути використана процедура динамічного програмування. Вона дозволяє вирішувати завдання, що виникають при оптимізації в значно коротші терміни, ніж поваріантні розрахунки.

Логічною основою нового методу є принцип оптимуму Р. Беллмана. Згідно нього: рішення, що приймається в кожному циклі, має бути найкращим відносно процесу в цілому. Це можна здійснити в наступній послідовності: незалежно від передісторії процесу, його стану і рішень, прийнятих раніше, усі рішення ті, що впливають на подальші етапи, з точки зору цього етапу процесу, мають бути оптимальними. При цьому необхідно усі чинники, що впливають на протікання процесу, охопити настільки точно, щоб будь-яка керована логічна змінна могла орієнтувати на оптимум. Точність охоплення процесу зростає з діленням його на все менші підетапи.

При діленні процесу на етапи ні в якому разі не повинне виникати переривання матеріального потоку. Будь-яка зміна стану повинна відбуватися в межах певного етапу, а не в проміжках між ними.

Для можливості застосування цього підходу при моделюванні експлуатації родовища корисної копалини цей процес освоєння конкретного родовища необхідно представити у вигляді декомпозиційної системи з формалізацією завдань на окремих етапах зміни стану запасів корисних копалини від балансових до видобутого металу з подальшим списанням запасів з балан-

су [13]. Безперервність процесу забезпечується поетапною зміною стану проектних балансових запасів.

При розгляді освоєння золоторудного родовища слід розглядати як мінімум одинадцять етапів: 0 - запаси затверджені і передані на баланс підприємства; 1 - запаси в стані забезпеченості трудовими ресурсами; 2 - запаси в стані забезпеченості транспортними зв'язками; 3 - запаси в стані забезпеченості непромисловими об'єктами; 4 - запаси в стані енергоозброєності; 5 - запаси в стані забезпеченості промисловими об'єктами; 6 - запаси в стані розкриття; 7 - запаси в стані виймання із надр; 8 - запаси в стані переміщення; 9 - запаси в стані переробки на збагачувальній фабриці; 10 - запаси в стані металу (концентрат); 11 - запаси списані з балансу.

При виборі сценарію освоєння такого родовища інфраструктура району, в якому воно розташоване, видобуток, транспортування і переробка руди розглядаються як взаємозв'язані елементи єдиної складної системи. При оптимізації моделі освоєння родовища, окрім принципу оптимуму Р. Беллмана, повинні виконуватись додаткові вимоги:

- при переході з етапу на етап слід враховувати тільки зв'язки-поєднання логічно або технологічно сумісних реальних варіантів;
- на усіх етапах процесу отримання кінцевої продукції діють параметри, які керуються, одним відомством.

Раціональний обсяг виробництва. Гірничо-збагачувальний комбінат в короткостроковому періоді (підприємстві має в розпорядженні незмінне устаткування) намагається максимізувати свої прибутки, пристосувавши свій обсяг виробництва за допомогою змін у величині змінних ресурсів (матеріалів, праці і так далі), які він використовує. Економічні прибутки до яких комбінат прагне, визначаються як різниця між валовим доходом і витратами. У цьому напрямі слід проводити аналітичні дослідження.

Існує два підходи до визначення рівня виробництва, при якому комбінат отримуватиме максимальний прибуток або мінімальні збитки. Перший включає порівняння валових доходу і витрат, другий – порівняння граничних доходу і витрат.

У аналізі двох підходів використовуватимуться показники виробництва конкретного підприємства на родовищі золота. У перевірочній таблиці для аналізу окрім валового доходу TR (total return), валових витрат TC (total cost), їх похідних – граничного доходу MR і граничних витрат MC для вирішення питання виробляти або ні продукцію важливими показниками є дані про середні загальні витрати ATC (average total costs), середні постійні витрати AFC (average fixed costs), середні змінні витрати AVC (average variable costs).

При визначенні фактичного прибутку або збитку, пов'язаних з виробництвом при якому $MR = MC$, мають бути порівняні ціна і середні валові витрати. Відрізок кривої граничних витрат в короткостроковому періоді, який лежить вище кривою середніх змінних, є кривою пропозиції продукції гірничо-збагачувального комбінату в короткостроковому періоді.

Екологічний аспект освоєння родовища. Запропонований у цій статті підхід представлення процесу за увесь період освоєння конкретного родовища дозволяє обґрунтувати область ефективної експлуатації альтернативними

розробниками з різними правами на користування надрами і різними можливостями за фінансами, трудовими і матеріальними ресурсами. Моделювання декомпозиційної системи з формалізацією завдань на окремих етапах зміни стану запасів корисних копалини від балансових до видобутого металу за допомогою фахових комп'ютерних програм дозволяє шляхом багатократних варіантних розрахунків проводити геолого-економічну переоцінку запасів родовищ.

Потенціал розвитку досліджень в напрямку оптимізації мережевих моделей достатній для здійснення економічної оцінки екологічного аспекту освоєння родовищ корисних копалин [2, 18, 19]. Процедура такої оцінки полягає у фінансовому порівнянні двох сценаріїв освоєння – оптимального з економічної точки зору із екологічно переважним. Реалізувати процедуру порівняння цих варіантів можна буде на базі методології моделювання процесу освоєння родовища на усіх етапах отримання кінцевої продукції за економічними показниками (мінімальна собівартість, прибуток) і моделювання процесу освоєння родовища з урахуванням екологічних переваг на усіх етапах розробки і збагачення копалини.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Модель освоєння родовища. Модель процесу освоєння родовища може бути побудована у вигляді альтернативного графу, в якому логічними зв'язками пов'язані варіанти спорудження і експлуатації об'єктів енергопостачання, транспорту, соціально-культурного, поверхневого і підземного комплексів гірничо-збагачувального підприємства з видобутку золота. Дуги графу представлені числовими значеннями витрат або формалізацією виробничих процесів керуючими параметрами.

На рис. 1 зображений альтернативний граф з 37 вузлами визначення стратегії освоєння золоторудного родовища. Кожна дуга (i, j) має свою довжину t_{ij} . У спрямованому ациклічному графові можна помітити вузли цілими числами від 1 до N таким чином, що для кожної дуги (i, j) справедлива нерівність $i < j$. Найкоротший шлях від вузла 1 до вузла j повинен містити деяку дугу в якості кінцевої і тому [16]

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

Для знаходження найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла 37 використовується метод динамічного програмування. Безліч рішень оптимізаційних завдань описується функціональним рівнянням, аналогічним рівнянню (1). Функціональне рівняння є системою рівнянь, які зв'язують декілька оптимізаційних завдань. У такій системі кожне рівняння відповідає одному вузлу. Рішення безлічі оптимізаційних завдань можна знайти за допомогою, так званого, алгоритму зворотного прогону, який рівнозначний впорядкованій процедурі рішення послідовності функціональних рівнянь.

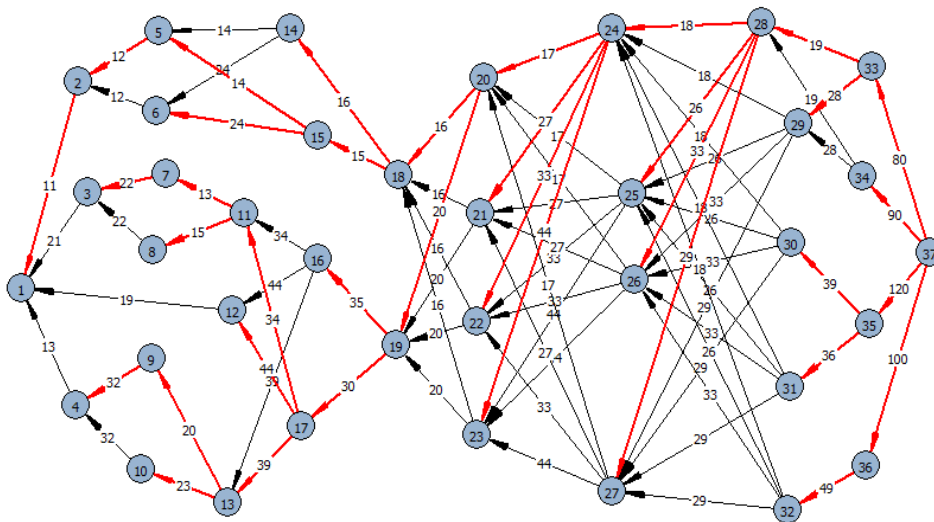


Рисунок 1. Альтернативний граф з 37 вузлами визначення стратегії освоєння золоторудного родовища на фрагменті програми динамічного програмування

Алгоритм зворотного прогону приведений в роботі [1]. Він придатний для обчислень в ациклічних мережах. Більше того, розрахунки можна починати у будь-якому кінці мережі і рухатися у зворотному напрямі до іншого її кінця. При цьому передбачається проведення однієї обчислювальної операції для кожної дуги. Таким чином, навряд чи існує більш ефективний алгоритм, ніж зворотний прогін. На рис. 1 показано результати розрахунків мережевої моделі освоєння родовища у вигляді найкоротшого маршруту (червона суцільна лінія): 1–2–5–15–18–20–24–28–33–37.

Сенс логічних переміщень описаний табличним варіантом в роботі [13] у вигляді витрат на виконання альтернативних процесів на етапах з моменту затвердження і передачі запасів на баланс підприємства до списання запасів з балансу. У таблиці 1 приведений фрагмент табличного опису структури дискретної математичної моделі, в якому для прикладу дана розшифровка варіантів деяких етапів процесу освоєння конкретного родовища, номери циклів, зміна системи в циклі, сенс логічних змінних і значення дуг у відносних одиницях.

На цій стадії моделювання йдеться не про вибір найбільш оптимальних показників, а про розрахунок основних техніко-економічних показників для підготовки початкових даних. Для виконання варіантних розрахунків техніко-економічних показників, включаючи експлуатаційні витрати при розкритті, видобутку і переробці для початкових даних на відповідних етапах моделі освоєння інструментом була розроблена спеціалізована «Програма знаходження найкоротших відстаней між усіма вершинами мережевої моделі» «GraphON.v1.2017» [18].

Таблиця 1. Фрагмент табличного опису альтернативного графа процесу зміни стану запасів родовища

Порядковий номер етапу освоєння	Найменування етапів процесу зміни стану запасів	Номер циклу	Зміна системи в циклі	Сенс логічної змінної	Значення дуги
0	Запаси затверджені і передані на баланс підприємства			Початок процесу	
1	Запаси в стані забезпеченості трудовими ресурсами	1	2	Витрати на непромислові об'єкти при розширенні житла у базовому селищі	S 1_1
		1	3	Витрати на промислові об'єкти при розширенні житла у базовому селищі при експедиційному методі освоєння родовища	S 2_1
		1	4	Витрати при вахтовом методі освоєння	S 1_3
		1	12	Витрати при будівництві нового селища на родовищі	S 1_4
. . .					
10	Запаси в стані металу (концентрат)	33	37	Отримання прибутку на старій збагачувальній фабриці	S 1_10
		34	37	Отримання прибутку на реконструйованій ЗФ	S 2_10
		35	37	Отримання прибутку на новій ЗФ, розташованій в селищі	S 3_10
		36	37	Отримання прибутку на новій ЗФ, розташованій на родовищі	S 4_10
11	Запаси списані з балансу	37	0	Кінець процесу	

Цей методологічний підхід було реалізовано при розрахунку для багатьох родовищ рідкісних і благородних металів з різними гірничо-геологічними умовами і різними формами рудних тіл. Це були круті тонкі та малопотужні жили, жили з кутами падіння (дуетського типу), що змінюються, потужні похилі і круті рудні тіла, а також малооб'ємні золоторудні родовища.

В Інституті фізики гірничих процесів НАН України для розвитку рішень гірничих технологічних завдань методами дискретної математики також розроблено програмне забезпечення із сучасним інтерфейсом щодо втілення алгоритмів динамічного програмування на мережевих моделях. «Програма динамічного програмування альтернативного графу на мінімум» «DinMin.v2_2019» призначена для вибору сценарію освоєння родовищ корисних копалин з мінімальними витратами, мінімально можливим збитком і максимальним прибутком з урахуванням взаємодії екологічних норм будівництва, видобутку, транспорту і переробки, як ланок однієї системи, яка працює на кінцевий результат у вигляді ринкового товару.

Раціональний обсяг виробництва. Як приклад обґрунтування раціонального обсягу виробництва можна привести рис. 2, 3, на яких проілюстровані результати аналізу видобутку золота однієї із старательських артілей у Республіці Саха.

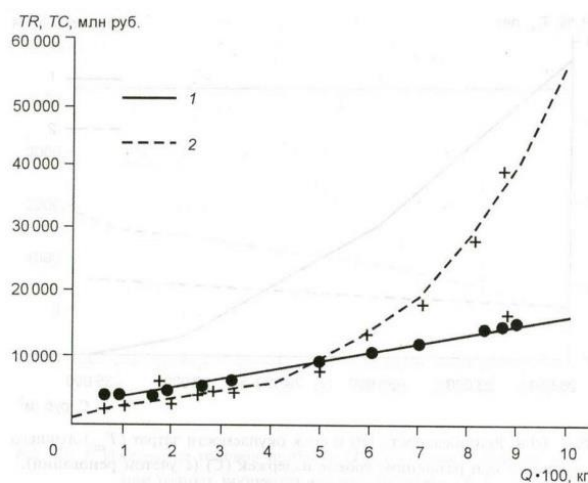


Рисунок 2. Динаміка загальних витрат виробництва металу (TC) і доходу (реалізації) (TR) залежно від об'єму видобутку золота (Q). 1 – TR, 2 – TC

Дослідження проведені за фактичною інформацією 1994 року одним з авторів цієї статті [10]. Інструментами аналізу являються терміни і критерії, загальноприйняті в ринковій економіці [11]. Статистичний аналіз реалізації металу (доходу) TR і витрат TC залежно від об'єму видобутку золота Q (рис. 2) вказує на перевищення витрат над доходами при виробництві більше 500 кг металу.

Для визначення рівня виробництва з максимальним прибутком проведений статистичний аналіз середніх постійних витрат (рис. 3) AFC, середніх змінних витрат AVC, середніх загальних витрат ATC з побудовою кривих граничних витрат MC і граничного доходу MR. Дані аналізу ТЕП (техніко-

економічних показників) наочно демонструють два відомі підходи до визначення оптимального рівня виробництва фірми.

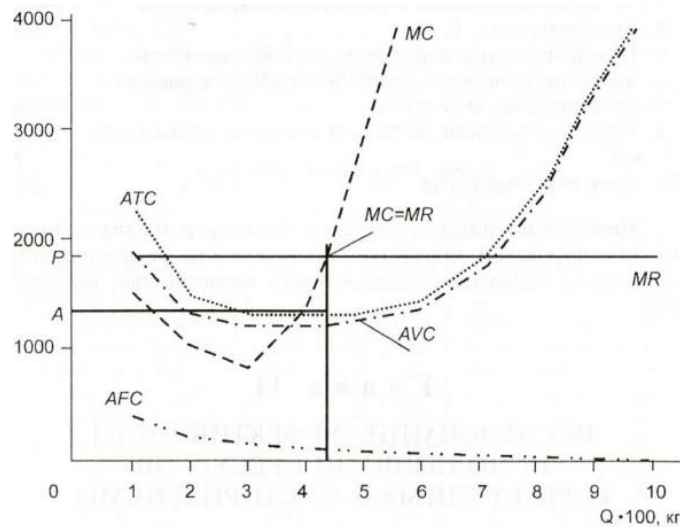


Рисунок 3. Положення підприємства, що максимізувало прибуток в коротко-строковому періоді

Більш наочний другий підхід, коли визначаються і порівнюються суми, які кожна додаткова одиниця продукції (у нашому випадку прийняті 100 кг металу) додаватиме з одного боку до валового доходу, з іншої – до валових витрат. Рациональний об'єм визначається координатами точки рівності MR і MC. На рис. 3 графічно порівнюються ціна металу P для підприємства $P = MR$ і граничні витрати MC. Обсяг виробництва, що максимізував прибуток, дорівнює 400 кг металу.

Аналіз кривої граничних витрат MC говорить про те, що на видобуток першої сотні кілограмів металу необхідно було витратити 1500 млн руб; другої – 1000; третьої – 800; четвертої – 1300, п'ятої – 2000 млн руб. У межах раціонального об'єму видобутку металу для освоєння цього родовища було рекомендовано оптимальні параметри розробки.

Екологічний аспект освоєння родовища. Під час вибору варіанта освоєння родовища необхідно проводити 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, зважаючи на детермінований характер формування рівня продуктивності.

Як приклад побудови альтернативного варіанта сценарію освоєння запасів невеликого родовища золота на рис. 4 наведений граф визначення екологічної стратегії освоєння раніше запропонованого родовища [2]. Представлений граф відрізняється від опублікованих раніше варіантів графічних сценаріїв, додатковим маркуванням вершин графа на всіх етапах освоєння родовища 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). Етапи освоєння запасів родовища характеризують зміни стану запасів, які охоплюють моделювання всього сценарію освоєння родовища від початку до отримання кінцевого продукту для аналізу пріоритетів з мінімальних витрат на одиницю кінцевої продукції та можливих варіантів ухвалення рішень на етапах освоєння, зокрема з огляду на екологічні переваги. Оптимальний шлях другого варіанта: 0–1a–3–5–6–7–10–12, виділений стовщеною лінією. Альтернативний варіант освоєння родовища відрізняється переробленням сировини на новій збагачувальній фабриці з повним виконанням екологічних нормативів, витрати на будівництво і експлуатацію якої складають фінансову різницю між економічним та екологічним сценаріями.

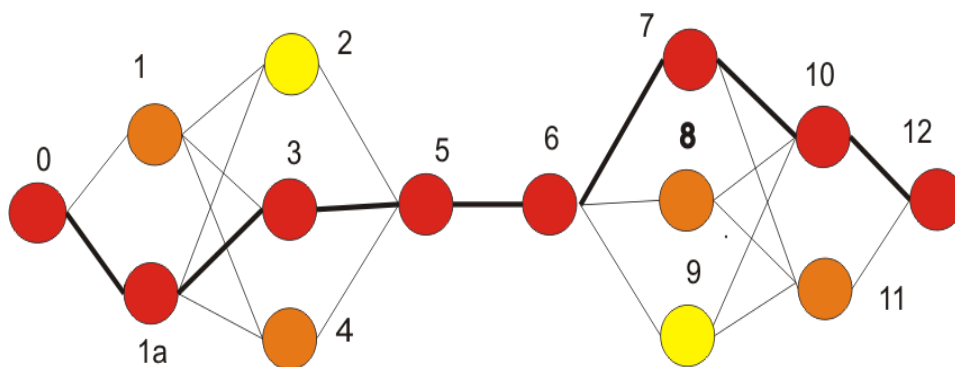


Рисунок 4. Альтернативний граф визначення екологічної стратегії освоєння невеликого золоторудного родовища. 0 - 12 - вузли

5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Проблема раціонального освоєння родовищ рідких і благородних металів повинна вирішуватися головним чином на стадії складання проекту розробки родовища, а техніко-економічні показники повинні охоплювати повний термін експлуатації об'єкту.

Приведені в цій статті методики і результати досліджень по оптимальному проектуванню параметрів експлуатації родовищ цінних корисних копалини України являються основою методології рішення складних завдань оптимізації параметрів гірничо-збагачувального підприємства на сучасному рівні інформаційних технологій. За допомогою цього інструментарію можна готувати обґрунтування для аргументованого ухвалення рішень власником ліцензії з основних питань технічного завдання на проектування розробки конкретного родовища, яке розташоване на освоєній території України.

Порядок обґрунтування техніко-економічних показників проектування (технічного завдання на розробку проекту) експлуатації родовища рекомендується наступний:

1. З отриманих пріоритетів кондицій родовища і показників промислового освоєння оцінюваного родовища, які були використані при обґрунтуванні цих кондицій, а також можливих варіантів ухвалення рішень на етапах освоєння родовищ будуються альтернативні графи визначення стратегії освоєння даних родовищ.

2. Розраховуються значення дуг в альтернативних графах.

Експлуатаційні витрати на варіантах в етапах зміни стану запасів слід визначати окремо за всіма основними стадіями робіт. Параметри систем розробки вибираються з урахуванням максимально можливої в даних умовах продуктивності праці і мінімальних втрат корисної копалини. Розробка запасів ув'язується з можливим варіантом розкриття.

Для виконання варіантних розрахунків початкових даних техніко-економічних показників і переводу графа у відповідну мережу моделі освоєння родовища інструментом може бути спеціалізована програма оптимізації мереж «GraphON.v1.2017». Для цього слід представити структуру виробничого процесу у вигляді мережі та оптимізувати її за одним із параметрів (наприклад, собівартість продукції).

Безумовно, ті показники, які можуть бути отримані в процесі розрахунку етапів, цієї моделі, носять рекомендаційний характер. Однак це дозволяє гірникам приймати рішення про доцільність або черговість відпрацювання рудних родовищ, а геологам, – виявляти найбільш «перспективні» для пошуків площі.

Логічною основою нового методу є принцип оптимуму Р.Беллмана. Згідно нього: рішення, що приймається в кожному циклі, має бути найкращим відносно процесу в цілому.

3. Розрахунки показників економічної ефективності інвестицій проводяться за варіантами на основі динамічного програмування моделі зміни стану запасів родовища від балансових до кінцевої продукції з формалізацією завдань на окремих етапах і визначенням оптимальної стратегії, яка характеризує найкращий сценарій освоєння родовища. Інструментом моделювання є комп'ютерна програма динамічного програмування «DinMin.v2_2019», яка містить можливості побудови і рішень математичної моделі та враховує:

- стан запасів родовища при його експлуатації в різних гірничо-геологічних, територіальних і соціальних умовах з урахуванням великого різноманіття форм рудних тіл і високої цінності корисної копалини;

- реалізацію принципу оптимуму Р.Беллмана, що прийняте рішення на кожному етапі моделі, має бути найкращим по відношенню до сценарію освоєння родовища в цілому;

- реалізацію алгоритму зворотного прогону, який рівнозначний впорядкованій процедурі рішення послідовності функціональних рівнянь;

- відповідність алгоритмів оптимізації мережевих моделей сучасному рівню інформаційних технологій.

4. В якості вихідних показників моделі виступають вартість отриманих з 1 т руди корисних компонентів, повна собівартість видобутку, транспортування і переробки 1 т руди, майбутні приведені витрати на 1 т вилученої руди при освоєнні родовища, питомі капітальні вкладення на освоєння родовища, річний прибуток від отримання кінцевої продукції, рентабельність як відношення прибутку до собівартості, коефіцієнт рентабельності капітальних вкладень, вартість отриманих з родовищ корисних копалин.

Результати варіантних розрахунків на моделі освоєння родовища дозволяють виконати статистичний аналіз середніх постійних витрат, середніх змінних витрат і середніх загальних витрат з побудовою кривих граничних витрат і граничного доходу для визначення рівня виробництва. Координати точки рівності цих показників вкажуть на раціональний рівень виробництва, який максимізує прибуток. Це буде ключовим показником для базового варіанту проектування експлуатації даного родовища із оптимальними параметрами гірничо-збагачувального підприємства для раціонального освоєння цінних корисних копалин.

В результаті 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 розробляється модель зміни стану запасів родовища від стадії розвідки до списання запасів з балансу, а також проводиться економічна оцінка, 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.

6. ВИСНОВКИ

Технологія оптимального проектування є інноваційною продукцією реалізації ефективного освоєння родовищ корисних копалини, яка базується на наукомістких процедурах ухвалення рішень. Оцінка ефективності таких проектів виконується шляхом моделювання потоків ресурсів і грошових коштів в межах деякого періоду (короткостроковий період), а потік грошових коштів наводиться до порівнянності по економічній цінності на дату оцінки шляхом процедури дисконтування.

На цьому матеріалі, використовуючи відомі методи оптимізації і критерії ефективності, апробовані і реалізовані в комп'ютерних програмах, можна обґрунтувати простір раціонального проектування ефективної експлуатації родовищ корисних копалини. Крім того, пакет програм дозволяє вирішувати питання, що включають:

- перегляд контурів балансових і забалансових запасів при різній продуктивності підприємства, впровадженні ресурсозберігаючих технологій видобутку, транспорту і переробки руди;
- обґрунтування області ефективної експлуатації альтернативними розробниками з різними правами на користування надрами і різними можливостями по фінансам, трудовим і матеріальним ресурсам;
- аналіз основних показників експлуатації родовища при організації невеликого підприємства з визначенням нижньої межі обсягу видобутку і змісту корисної копалини;
- геолого-економічну переоцінку запасів родовищ, перспективних для іноземних інвесторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Грінюв, В.Г., & Хорольський, А.О. (2018). Можливості ефективного освоєння рудних родовищ із запасами рідкісних і благородних металів. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*, (20), 113–122.
2. Грінюв, В.Г., Хорольський, А.О., & Каліущенко, О.П. (2019). Розроблення екологічних сценаріїв ефективного освоєння цінних родовищ корисних копалин. *Мінеральні ресурси України*, (2), 46–50.
3. Кодекс України про надра. (1994), *Відомості Верховної Ради України*, (36).
4. Методика визначення початкової ціни продажу на аукціоні спеціального дозволу на право користування надрами. (2004). *Кабінет Міністрів України*.
5. Методика визначення вартості запасів і ресурсів корисних копалин родовища або ділянки надр, що надаються у користування. (2004). *Кабінет Міністрів України*.
6. Положення про порядок розробки та обґрунтування кондицій на мінеральну сировину для підрахунку запасів твердих корисних копалин у надрах. (2005). *Наказ ДКУ по запасам корисних копалин*.
7. Hrinov V. (1992). Gold-ore deposits underground mining design taking into amount cryolithozone. In *Mining in the Arctic proceedings of the 2nd International symposium*. AA Balkema/ Rotterdam/ Brook-field, 315 p.
8. Гринев, В.Г. (1993). *Оценка и выбор рациональных параметров подземной разработки рудных месторождений Якутии*. Автореф. ... докт. техн. наук. Новосибирск: ИГД СО РАН.
9. Гринев, В.Г., Петров, А.Н., & Зубков, В.П. (1994). Определение области проектирования эффективной разработки рудных месторождений Якутии. *Горное дело в Арктике*, С.-Петербург.
10. Гринев, В.Г., Изаксон, В.Ю., & Зубков, В.П. (1999). *Решение горных задач на ЭВМ при освоении рудных месторождений*. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 215 с.
11. Макконнелл, К.Р., & Брю, С.Л. (1993). *Экономикс. Принципы, проблемы и политика*. М.: Республика, 799 с.
12. Рудько, Г.І., В.Г., Гриплі, & В.І. Логвинюков (2016). Правовий стан і напрями вдосконалення державної експертизи й оцінки запасів корисних копалин. *Мінеральні ресурси України*, (1), 3–7.
13. Гринев, В.Г. (1992). *Решение проблем разработки рудных месторождений Севера*. Новосибирск: ВО "Наука", 205 с.
14. Гринев, В.Г., Череповский, П.В., & Деуленко, А.И. (2015). *Инновационные перспективы эксплуатации угольных пластов крутого падения*. Днепр: Пороги. 180 с.

15. Sckwartz, W. (1968). Dunamishes programmlieriew erlautert am Belsplet der Optimierung Von Kupfergewinnungsverfahren. *Erzmetall*, (10), 455–460
16. Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press.
17. Беллман, Р., & Дрейфус, С. (1965). Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука.
18. Грін'юв, В.Г., & Хорольський, А.О. (2018). Комп'ютерна програма «Програма знаходження найкоротших відстаней між усіма вершинами мережевої моделі» («GraphON.v1.2017»). *Авторське право та суміжні права*, (47).
19. Хорольський, А.А., & Гринев, В.Г. (2018). Использование динамического программирования для проектирования горного производства при ограниченных ресурсах. In *Инновационные технологии в образовании, науке и производстве*: Минск: БНТУ. Режим доступа: <http://www.bntu.by/images/stories/mido/ntik6/horol.pdf>

REFERENCES

1. Grin'ov, V.G., & Horol's'kyj, A.O. (2018). Mozhyvosti efektyvnoho osvojennja rudnyh rodovyshh iz zapasamy ridkisnyh i blagorodnyh metaliv. *Fyzyko-tehnycheskye problemy gornogo proyzvodstva*, (20), 113–122.
2. Grin'ov, V.G., Horol's'kyj, A.O., & Kaliushhenko, O.P. (2019). Rozroblennja ekologichnyh scenarii'v efektyvnoho osvojennja cинnyh rodovyshh korysnyh kopalyn. *Mineral'ni resursy Ukrainy*, (2), 46–50.
3. Kodeks Ukrainy pro nadra. (1994), *Vidomosti Verhovnoi' Rady Ukrainy*, (36).
4. Metodyka vyznachennja pochatkovoї ciny prodazhu na aukcionі special'nogo-dozvolu na pravo korystuvannja nadramy. (2004). *Kabinet Ministriv Ukrainy*.
5. Metodyka vyznachennja vartosti zapasiv i resursiv korysnyh kopalyn rodovyshha abo di-ljanky nadr, shho nadajut'sja u korystuvannja. (2004). *Kabinet Ministriv Ukrainy*.
6. Polozhennja pro porjadok rozrobky ta obg'runtuvannja kondycij na mineral'nu syrovynu dlja pidrahunku zapasiv tverdyh korysnyh kopalyn u nadrah. (2005). *Nakaz DKU po zapasam korysnyh kopalyn*.
7. Hrinov V. (1992). Gold-ore deposits underground mining design taking into amount cryo-lithozone. In *Mining in the Arctic proceedings of the 2nd International symposium*. AA Balkema/ Rotterdam/ Brook-field, 315 p.
8. Grynev, V.G. (1993). *Ocenka y vybor racyonal'nyh parametrov podzemnoj razrobotky rudnuh mestorozhdenyj Jakutyu*. D.Sc.. Novosybyrsk: YGD SO RAN.
9. Grynev, V.G., Petrov, A.N., & Zubkov, V.P. (1994). Opredelenye oblasti proektyrovanyja efektyvnoj razrobotky rudnuh mestorozhdenyj Jakutyu. *Gornoe delo v Arktike*, S.-Peterburg.
10. Grynev, V.G., Yzakson, V.Ju., & Zubkov, V.P. (1999). *Reshenye gornikh zadach na EVM pry osvoenyy rudnuh mestorozhdenyj*. Novosybyrsk: Nauka, Sybyrskaja yzdatel'skaja fyрма RAN, 215 p.
11. Makkonnell, K.R., & Brju, S.L. (1993). *Ekonomyks. Pryncypi, problemi i polityka*. M.: Respublyka, 799 p.
12. Rud'ko, G.I., V.G., Grypl', & V.I. Logvynjukov (2016). Pravovyj stan i naprjamy vdoskonalennja derzhavnoi' ekspertyzy j ocinky zapasiv korysnyh kopalyn. *Mineral'ni resursy Ukrainy*, (1), 3–7.
13. Grynev, V.G. (1992). *Reshenye problem razrobotky rudnikh mestorozhdenyj Severa*. Novosybyrsk: VO “Nauka”, 205 p.
14. Grynev, V.G., Cherepovskij, P.V., & Deulenko, A.Y. (2015). Innovacyonnie perspektyvi ekspluatacyu ugol'nykh plastov krutogo padenyja. Dnepr: Porogy. 180 p.
15. Sckwartz, W. (1968). Dunamishes programmlieriew erlautert am Belsplet der Optimierung Von Kupfergewinnungsverfahren. *Erzmetall*, (10), 455–460.

16. Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press.
17. Bellman, R., & Dreyfus, S. (1965). *Przykladnie zadachy dynamyckiego programyrowania*. M.: Nauka.
18. Grin'ov, V.G., & Horol's'kyj, A.O. (2018). Komp'juterna programa «Programa znaho-dzhennja najkorotshyh vidstanej mizh usima vershynamy merezhevoi' modeli» («GraphON.v1.2017»). *Avtors'ke pravo ta sumizhni prava*, (47).
19. Horol'skyj, A.A., & Grynev, V.G. (2018). Ispol'zovanye dynamyckiego programyrovaniya dlja proektyrovaniya gornogo proyzvodstva pry ogranychennikh resursah. In *Innovacyonnie tehnologyy v obrazovanii, nauke y proyzvodstve*: Mynsk: BNTU. Retrived from: <http://www.bntu.by/images/stories/mido/ntik6/horol.pdf>

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Вирішити проблему ефективного освоєння родовищ рідкісних і благородних металів шляхом створення технології оптимального проектування.

Методика. Для моделювання процесу освоєння конкретного родовища застосовано методи динамічного програмування, вибір раціонального обсягу виробництва здійснено шляхом порівняння граничних витрат і доходу та врахування екологічного аспекту освоєння родовища.

Результати. Наведено результати моделювання стратегії освоєння золоторудного родовища спеціалізованою програмою динамічного програмування, проілюстровані розрахунки раціонального об'єму видобутку металу на реальному родовищі і наведено приклад побудови альтернативного варіанту екологічної стратегії освоєння родовищ золота.

Наукова новизна. Вперше запропоновано методики і результати досліджень по оптимальному проектуванню параметрів експлуатації родовищ цінних корисних копалини України, які є основою методології рішення складних завдань оптимізації параметрів гірничо-збагачувального підприємства та відповідають сучасному рівню інформаційних технологій.

Практична значимість. Запропоновано технологію оптимального проектування гірничозбагачувальних підприємств, яка є інноваційною продукцією з реалізації ефективного освоєння родовищ корисних копалини та базується на наукомістких процедурах ухвалення рішень.

Ключові слова: рідкісні і благородні метали, освоєння родовищ, проектування, моделювання, стан запасів, динамічне програмування, раціональний обсяг, параметри виробництва, екологія, оптимізація, комп'ютерні програми, інновація, ефективна експлуатація

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Решить проблему эффективного освоения месторождений редких и благородных металлов путем создания технологии оптимального проектирования.

Методика. Для моделирования процесса освоения конкретного месторождения применены методы динамического программирования, выбор рационального объема производства осуществлено путем сравнения предельных издержек и дохода и учета экологического аспекта освоения месторождения.

Результаты. Приведены результаты моделирования стратегии освоения золоторудного месторождения специализированной программой динамического программирования, проиллюстрированные расчеты рационального объема добычи металла на реальном месторождении и приведен пример построения альтернативного варианта экологической стратегии освоения месторождений золота.

Научная новизна. Впервые предложены методики и результаты исследований по оптимальному проектированию параметров эксплуатации месторождений ценных полезных ископаемых Украины, которые являются основой методологии решения сложных задач оптимизации параметров горно-обогатительного предприятия и соответствуют современному уровню информационных технологий.

Практическая значимость. Предложена технология оптимального проектирования горно-обогатительных предприятий, которая является инновационной продукцией по реализации эффективного освоения месторождений полезных ископаемых и базируется на наукоемких процедурах принятия решений.

Ключевые слова: редкие и благородные металлы, освоение месторождений, проектирование, моделирование, состояние запасов, динамическое программирование, рациональный объем, параметры производства, экология, оптимизация, компьютерные программы, инновация, эффективная эксплуатация

ABOUT AUTHORS

Grinev Vladimir, Doctor of Technical Science, Professor, Head of laboratory, Institute for Physics of the Mining Processes of National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: grinevv@ukr.net.

Khorolskyi Andrii, Candidate of Technical Science, Senior Researcher, Institute for Physics of the Mining Processes of National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: khorolskiyaa@ukr.net.