

## Роздел 4. Техніко-економічні проблеми горного виробництва

УДК 622.22.553.4:519.85

В.Г. Грін'юв, А.О. Хорольський

### МОЖЛИВОСТІ ЕФЕКТИВНОГО ОСВОЄННЯ РУДНИХ РОДОВИЩ ІЗ ЗАПАСАМИ РІДКІСНИХ І БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ

Інститут фізики гірничих процесів НАН України,  
49600, г. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2-а.

**Мета.** Розробити новий підхід щодо ефективного освоєння рудних родовищ із запасами рідких та благородних металів.

**Методика.** Оцінити і зробити вибір в різних гірничо-геологічних, територіальних і соціальних умовах з урахуванням великого різноманіття форм рудних тіл і високої цінності корисної копалини можливо на основі динамічного програмування.

**Результати.** Наведено модель зміни стану балансових запасів вітчизняних родовищ з урахуванням поточних і обов'язкових умов динамічного програмування. Описана методика оптимізації моделі і рекомендовано інформаційне забезпечення для розрахунків.

**Наукова новизна.** Запропонований підхід дозволяє обґрунтовувати область ефективної експлуатації альтернативними розробниками з різними правами на користування надрами і різними можливостями за фінансами, трудовими і матеріальними ресурсами, а також проводити геолого-економічну переоцінку запасів родовищ, перспективних для іноземних інвестицій шляхом багатократних варіантних розрахунків можна обґрунтувати зміну кондицій.

**Практична значимість.** Наведені способи дозволяють визначити рентабельність експлуатації реальних запасів золоторудних родовищ та демонструють можливості ефективного освоєння запасів цінних руд, а також можуть бути застосовані при створенні потужних якірних проектів на роцування власного мінерально-сировинного комплексу України.

**Ключові слова:** рідкісні і благородні метали, освоєння родовищ, динамічне програмування, стан запасів, алгоритм, комп'ютерні програми, оптимізація, ефективна експлуатація, якірні проекти, інвестиційна привабливість.

### Вступ

Надра нашої незалежної країни наділені багатством, яке включає понад два десятки видів корисних копалин, які мають велике значення для еконо-

міки країни. На тлі гострого дефіциту державних фінансів важко переоцінити потребу України в ефективній експлуатації своїх надр, в першу чергу, освоєнні стратегічних корисних копалини – рідкісних і благородних металів.

Передісторія геологорозвідувальних робіт по виявленню золотоносних родовищ на території нашої держави має аналогічні корені у геологорозвідці українських нафтогазових родовищ – керівництво СРСР розробкою стратегічних родовищ в Україні не цікавилася. Тоді ставка робилася на Урал, Сибір, Далекий Схід і республіки Середньої Азії.

Історія спроб освоєння золоторудних родовищ в Україні розпочалася з надбання незалежності. Ключові її моменти загальновідомі, а історія українського золота як «Клондайк для аферистів» доступна широкому колу користувачів мережі Internet [1]. У перелік цих моментів входять: розвідка більше десятка родовищ з промисловими запасами, програма «Золото України», створення компанії «Укрзолото», золотий тризуб, ліквідація «Укрзолото» через неефективність роботи, створення ПАТ «Українські поліметали» на чолі з російською командою, не ефективна розробка Клінцовського і Мужієвського родовищ з елементами декларативності і, як наслідок, ліквідація ПАТ «Український поліметал». Спроба інтенсифікації видобутку золота за рахунок залучення іноземних компаній в статусі повноправних надрокористувачів не увінчалася успіхом, також не було успіхів і в «золотобатонному» періоді, в якому НБУ України був наділений нечуваними «золотими» повноваженнями. Проте дані про видобуток золота за цей період відсутні.

Сьогодні внаслідок складного становища економіки країни, що зумовлює недостатні обсяги проведення геологознімальних, пошукових і розвідувальних робіт, темпи та обсяги відтворення власної мінерально-сировинної бази не відповідають потребам країни [2]. В Програмі діяльності Кабінету Міністрів України на середньостроковий період в цільових кількісних показниках відсутні дані щодо приросту ресурсів стратегічної сировини, у тому числі запасів благородних металів (золота) та ресурсів рідкісноземельних металів. Фактично обсяги проведення геологорозвідувальних робіт скоротилися у 3–4 рази.

В той же час, на тлі кризи в золотодобуванні, геологами отримуються позитивні результати в оцінці нових родовищ золота та наголошується перспективність подальших геологорозвідувальних робіт [3, 4].

Зараз із неофіційних джерел відомо, що найбільші реальні запаси золота знаходяться в десятці родовищ, які розташовані в Закарпатській, Кіровоградській, Одеській і Дніпропетровській областях. Проте, жодне з цих родовищ з різних причин не освоєне належним чином. Запаси золота в країні є, а їх освоєння нема.

## 1. Постановка задачі

Особливістю ефективного освоєння запасів цінних металів є необхідність організації раціональної експлуатації рудних родовищ на базі вирішення багатьох питань, які не пов'язані безпосередньо з гірничими роботами. Для освоєння родовищ корисних копалин з мінімальними витратами, мінімально можливим збитком і максимальним прибутком потрібна узгоджена взаємодія в межах екологічних норм будівництва, видобутку, транспорту і переробки, як ланок однієї системи, яка працює на кінцевий результат у вигляді ринкового товару.

Усі особливості такої системи можна відобразити в моделі стану запасів родовища при його експлуатації. Оцінити і зробити вибір в різних гірничо-геологічних, територіальних і соціальних умовах з урахуванням великого різноманіття форм рудних тіл і високої цінності корисної копалини можливо на основі динамічного програмування [5]. Перший досвід рішення завдань по вибору оптимальних стратегій освоєння родовищ рідкісних і благородних металів на основі динамічного програмування описаний в роботі автора цієї статті [6], яка нострифікована в Україні у 2002 році.

Таким чином, дослідження пов'язані з вирішення проблем ефективного видобутку з надр цінних корисних копалин є дуже актуальними у нашій країні.

## 2. Методики дослідження

Описати однією цільовою функцією усі проектні параметри гірничо-збагачувального підприємства, яке будується і буде працювати, через складність системи практично неможливо. Отже, процес за увесь період 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 балансу.

Обов'язкова умова динамічного програмування – безперервність процесу, що оптимізується, тому в даному випадку приймається поетапна зміна стану проектних балансових запасів. При розгляді освоєння золоторудного родовища слід розглядати як мінімум дванадцять 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.

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

При виборі сценарію освоєння такого родовища інфраструктура району, в якому воно розташоване, видобуток, транспортування і переробка руди розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиної складної системи. Методика оптимізації математичної моделі освоєння родовищ з рідкісними і благородними металами базується на наступному:

- на принципі оптимуму Р. Беллмана [7], який полягає в тому, що рішення яке приймається на кожному етапі процесу, має бути найкращим по відношенню до процесу в цілому;
- при переході з етапу на етап слід враховувати тільки зв'язки-послання логічно або технологічно сумісних реальних варіантів;
- на усіх етапах процесу отримання кінцевої продукції діють параметри, які керуються, одним відомством.

### 3. Результати дослідження

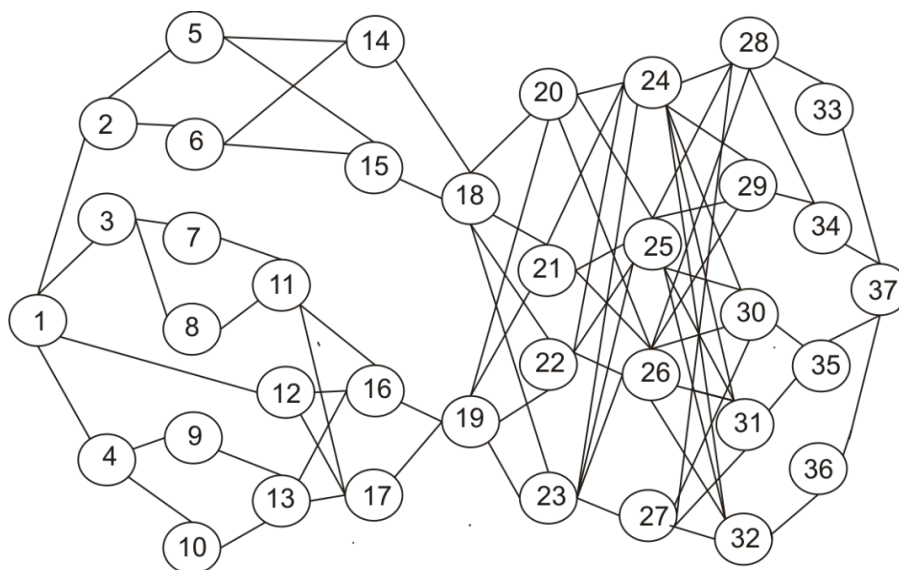
Завдання слід представити у вигляді пошуку найкоротшого шляху в орієнтованому ациклічному графі. Орієнтований граф складається з непорожньої кінцевої множини вузлів  $S$  і підмножини  $T$  множини  $SS$ .

Елементи множини називаються дугами. Наявність дуги  $(i, j)$  вказує на можливість руху вузла  $i$  до вузла  $j$ . Шляхом  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$  називається кінцева послідовність вузлів таких, де  $(i_k, i_{k+1})$  є спрямованою дугою  $k = 1, 2, \dots, n-1$ .

У спрямованому ациклічному графові можна помітити вузли цілими числами від 1 до  $N$  таким чином, що для кожної дуги  $(i, j)$  справедлива нерівність  $(i < j)$ . На рис. 1 зображений граф з 37 вузлами на одинадцятьох етапах. Кожна дуга  $(i, j)$  має свою довжину  $t_{ij}$ . Для знаходження найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла 37 використовується метод динамічного програмування.

Нехай  $f_i$  – довжина найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла  $i$ , тоді  $f_1 = 0$ . З визначення  $f_i$  також виходить, що  $f_i + t_{ij}$  – довжина найкоротшого шляху від вузла 1 до вузла  $j$  за умови, що останньою дугою шляху є дуга  $(i, j)$ .

Сенс логічних переміщень описано табличним варіантом представлення альтернативного графу процесу зміни стану запасів золоторудного родовища в роботі [8], у вигляді витрат на виконання альтернативних процесів з моменту затвердження і передачі запасів на баланс підприємства до списання запасів з балансу.



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

Найкоротший шлях від вузла 1 до вузла  $j$  повинен містити деяку дугу в якості кінцевої і тому [5]

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

Кажуть, що дуга  $(i, j)$  виходить з вузла  $i$  та входить у вузол  $j$ . Для усіх дуг, що входять у вузол  $j$ , має місце нерівність  $(i < j)$ . Це означає, що вираз (1) використовується для обчислень  $f_i$  при  $j = 2, 3, \dots, 37$ . Замість того, щоб вирішувати задачу безпосередньо, було здійснено занурення її в клас завдань про найкоротший шлях, а саме обчислення  $f_i$  для усіх  $j$ . Така особливість характерна фактично для кожної моделі багатокрокового процесу.

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.

Алгоритм зворотного прогону [5]:

Крок 1. Покласти  $v_1 = 0$  та  $v_k = \infty$  для  $k = 2, 3, \dots, N$ . Покласти  $j = 2$ .

Крок 2. Для кожної дуги  $(i, j)$ , що входить у вузол  $j$ , покласти

$$v_j \leftarrow \min(v_j, v_i + t_{ij}) \quad (2)$$

Крок 3. Зупинитися, якщо  $j = N$ . Інакше  $j \leftarrow (j + 1)$  та повернутись до кроку 2.

Крок 2 полягає в заміні  $v_j$  на  $v_i + t_{ij}$  всякий раз, коли остання величина менша за  $v_j$ . Цей крок виконується для кожної дуги, що входить у вузол  $j$ , при цьому порівняння робиться за зростанням номерів  $i$ . Крок 2 закінчується при  $v_i = f_j$ .

Таким чином, алгоритм зворотного прогону дозволяє отримати довжину найкоротшого маршруту (шляху), але не сам маршрут. Для знаходження найкоротшого шляху треба запам'ятовувати номери дуг  $(i, j)$ , які складають маршрут довжиною  $v_j$ .

Цей алгоритм придатний для обчислень в ациклічних мережах. Більш того, розрахунки можна починати у будь-якому кінці мережі і рухатися у зворотному напрямку до іншого її кінця. При цьому, передбачається проведення однієї обчислювальної операції для кожної дуги. Таким чином, напевно чи існує більш ефективний алгоритм, ніж зворотний прогін.

Принцип оптимальності для нашого завдання: підшлях найкоротшого шляху сам є найкоротшим шляхом. Більше універсальний варіант принципу включає поняття стратегії.

Стратегія визначає дугу  $(i, j)$ , що входить в кожний з вузлів  $j$ , окрім першого  $j = 1$ . Існує безліч стратегій для цієї ациклічної мережі. Стратегія називається оптимальною для вузла  $j$ , якщо вона виявляє дуги, що утворюють найкоротший шлях від вузла 1 до вузла  $j$ . Оптимальна стратегія характеризує оптимальний сценарій освоєння родовища.

В математичній моделі освоєння золоторудного родовища на етапах розкриття і видобутку руди йдеться не про вибір найбільш оптимального способу розкриття або розробки, а про розрахунок основних техніко-економічних показників експлуатації родовища. Модель дозволяє розраховувати параметри системи розробки, якою можна відпрацювати запаси з ув'язкою можливих варіантів розкриття. Вибір варіантів розкриття і видобутку відбувається на стадії підготовки початкових даних.

Для оптимізації процесу зміни стану запасів родовищ рідкісних і благородних металів розроблені стандартні програми динамічного програмування на мінімум та максимум за визначенням оптимальних стратегій альтернативного графа DINAMIC і DIMAX. Деталі програм, які написані на мові Pascal, приклади введення даних і результатів розрахунків наведені в роботі [9]. У основу інформаційного забезпечення оптимізаційних розрахунків закладені дані натуральних показників родовища, інфраструктура району освоєння, ДБН України і дані додаткових техніко-економічних розрахунків стадій освоєння. За результатами обчислень визначаються показники родовища в грошовому виразі, на підставі яких можна зробити промислову економічну оцінку родовища.

Програми були реалізовані при розрахунку для багатьох родовищ рідкісних і благородних металів з різними гірничо-геологічними умовами і різними формами рудних тіл [6]. 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 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.

Безумовно, ті показники, які можуть бути отримані в процесі розрахунку етапів, цієї моделі, не можуть розглядатися в якості кінцевих значень керуючих параметрів. Вони носять рекомендаційний характер, це дозволяє гірникам приймати рішення про доцільність або черговість відпрацювання рудних родовищ, а геологам, – виявляти найбільш «перспективні» для пошуків площі. Розрахунки також можуть показати нижню межу об'єму видобутку і вмісту корисної копалини при організації невеликого підприємства для розробки вахтовим або експедиційним методом.

#### **4. Обговорення результатів**

Запропонований підхід дозволяє обґрунтовувати область ефективної експлуатації альтернативними розробниками з різними правами на користування надрами і різними можливостями за фінансами, трудовими і матеріальними ресурсами, а також проводити геолого-економічну переоцінку запасів родовищ, перспективних для іноземних інвестицій шляхом багатократних варіантних розрахунків можна обґрунтувати зміну кондицій.

Розроблена модель освоєння золоторудного родовища дозволяє оцінювати не лише економічний але і екологічний ефект. Для цього необхідно вершини графу навантажити відповідно до екологічних переваг на думку незалежної експертизи. При оптимізації такого графа рекомендується стратегія за сценарієм освоєння запасів найбільш екологічно переважному. При зіставленні екологічного і економічного сценаріїв, в яких альтернативи відповідають ГДК (гранична допустима концентрація), різниця витрат визначає обсяг фінансування на екологію при освоєнні цього родовища. У разі, якщо альтернатива явно екологічно не прийнятна, то відповідну вершину графа треба обважнювати, щоб вона не потрапила в стратегію.

Для реалізації рішень завдань раціональної експлуатації родовищ методами дискретної математики автори продовжують дослідження у напрямі відповідності алгоритмів оптимізації мережевих моделей сучасному рівню інформаційних технологій. Зареєстрована комп'ютерна програма «Програма оптимізації мережевих моделей», яка на основі класичних алгоритмів пошу-

ку найкоротшого шляху між двома виділеними вершинами графу, дозволяє розрахувати оптимальне значення необхідного параметра [10, 11].

### Висновки

У цій роботі автори описали сучасні і надійні способи визначення рентабельності експлуатації запасів, виявлених або очікуваних, до розкриття золоторудних родовищ, а результати по цьому напряму залежать, в першу чергу, від політичної волі відповідних державних органів управління, а також від участі в освоєнні українських родовищ досвідчених фахівців з академічних та галузевих наукових установ, які традиційно мають незалежну і об'єктивну точку зору з позиції державних інтересів.

Представлена в наведеній статті методологія реально дозволяє створити потужні якісні проекти, які закладуть фундамент для формування позитивного іміджу країни на світовому ринку та підвищать інвестиційну привабливість розробки родовищ. Це, в свою чергу, забезпечує можливості сталого розвитку країни за рахунок нарощування власного мінерально-сировинного комплексу.

1. Chernaya, N. (2018). Ukrainское zoloto: Klondajk dlya aferistov Retrieved from <https://economics.unian.net/industry/1167150-ukrainskoe-zoloto-klondajk-dlya-aferistov.html>.
2. Serednostrokovij plan prioritetnih dij Uryadu do 2020 roku (2018). Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/ua/diyalnist/programa-diyalnosti-uryadu/serednostrokovij-plan-prioritetnih-dij-uryadu-do-2020-roku>.
3. Lisenko, O.A. (2018). Stan pidgotovlenosti zolotorudnih rodovishch Ukraini do promislovogo osvoennya. Aktual'ni problemi ta perspektivi rozvitku geologii: nauka i virobnictvo, (1), K.: UkrDGRI.
4. Na Zakarpatti viyavili velike rodovishche zolota roku (2018). Retrieved from [https://zaxid.net/na\\_rahivshhini\\_viyavili\\_nove\\_rodovishhe\\_zolota](https://zaxid.net/na_rahivshhini_viyavili_nove_rodovishhe_zolota).
5. Mouderv, Dzh., & Ehlmagrabi, S. (1984). Issledovanie operacij, M.: Mir.
6. Hrinov, V.G. (1993). Ocenka i vybor racional'nyh parametrov podzemnoj razrabotki rudnyh mestorozhdenij Yakutii. Doctoral Dissertation IGD SO RAN.
7. Shvarc, V. (1968). Dinamicheskoe programmirovaniye na primere optimizacii tekhnologii vyplavki mednoj rudy, *Erzmetall*, (10).
8. Grinev, V.G. (1992). Reshenie problem razrabotki rudnyh mestorozhdenij Severa. Novosibirsk: Nauka.
9. Grinev, V.G., Izakson, V.Yu. & Zubkov, V.P. (1999). Reshenie gornyh zadach na EVM pri osvoenii rudnyh mestorozhdenij. Novosibirsk: Nauka.
10. Grinev, V.G., & Khorolskiy, A.O. (2018). Komp'yuterna programa «Programa znahodzhennya najkorotshih vidstanej mizh usima vershinami merezhevoi modeli» («GraphON.v1.2017»). Patent No. 75055, Ukraine.
11. Khorolskiy A.A. & Grinev V.G. (2018). Vybor scenariya osvoeniya mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. *Geologiya i ohrana nedr*, (68),68–75.



*В.Г. Гринев, А.А. Хорольский*

## ВОЗМОЖНОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ОСВОЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ЗАПАСАМИ РЕДКИХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

**Цель.** Разработать новый подход для эффективного освоения рудных месторождений с запасами редких и благородных металлов.

**Методика.** Оценить и сделать выбор при различных горно-геологических, территориальных и социальных условиях с учетом большого разнообразия форм рудных тел и высокой ценности полезных ископаемых можно на основе динамического программирования.

**Результаты.** Представлена модель изменения состояния балансовых запасов отечественных месторождений с учетом текущих и обязательных условий динамического программирования. Описана методика оптимизации модели и рекомендовано программное обеспечение для расчетов.

**Научная новизна.** Предложенный подход позволяет обосновывать область эффективной эксплуатации с альтернативными разработчиками с разными правами на пользование недрами и различными возможностями по финансам, трудовыми и материальными ресурсами, а также проводить геолого-экономическую переоценку запасов месторождений, перспективных для иностранных инвестиций, путем многократных вариантных расчетов можно обосновать изменение кондиций.

**Практическая значимость.** Приведенные способы позволяют определить рентабельность эксплуатации реальных запасов золоторудных месторождений и демонстрируют возможности эффективного освоения запасов ценных руд, а также могут быть применены при создании мощных якорных проектов наращивания собственного минерально-сырьевого комплекса Украины.

**Ключевые слова:** редкие и благородные металлы, освоение месторождений, динамическое программирование, состояние запасов, алгоритм, компьютерные программы, оптимизация, эффективная эксплуатация, якорные проекты, инвестиционная привлекательность.

*V.G. Hrinov, A.A. Khorolskyi*

## POSSIBILITY OF EFFECTIVE DEVELOPMENT OF ORE DEPOSITS WITH RE-SERVES OF RARE AND PRECIOUS METALS

**Purpose.** To propose a new approach to the design of layout of ore deposits with reserves of rare and precious metals.

**Methods.** 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.** 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.