

УДК 622.22.553.4:519.85

<https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.011>

**НАУКОВІ ОСНОВИ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕЖ ОБЛАСТІ  
РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ  
РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН**

А.О. Хорольський<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України,  
м. Дніпро, Україна

\*Відповідальний автор: e-mail: khorolskiyaa@ukr.net

**SCIENTIFIC APPROACHES FOR PROPOSING AREA EFFICIENT  
ENGINEERING IN THE MINING OF MINERAL DEPOSITS**

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

<sup>1</sup>Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of  
Ukraine, Dnipro, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail:khorolskiyaa@ukr.net

**ABSTRACT**

**Purpose.** To develop a new approach to designing a process for cost-effective and environmentally friendly development of mineral deposits.

**Methods.** The terms of reference for the development of a project for the effective development of mineral deposits provides for the justification of the boundaries of the area of rational design, which determines the optimal numerical values of the set of parameters that characterize the processes of development of deposits. The procedure for determining the optimal parameters is carried out by examining the state of change in mineral reserves from balance to final products in the form of a single complex system of interconnected elements of technological chains, technological schemes, quality indicators of raw materials and their volumes.

**Findings.** An algorithm for designing the process of developing mineral deposits is proposed. The algorithm indicates the relationship between the design tasks in the form of a hierarchical structure, which includes four levels (strategic, integrated, longwall, technological) that form the design tasks of this process. Regardless of the type of mineral, design tasks involve process optimization, which is implemented based on a decomposition approach.

**Originality.** The conceptual foundations of effective development of mineral deposits have been formed, according to which - the criterion of optimality is quality, which is expressed in ash content, the degree of dilution, and negative impact on the environment; process design begins with determining the volume of extraction of minerals from the subsoil; the project includes economic and environmental strategies for mining, while in case of inconsistency of the economically advantageous strategy with a safe one, additional stages for the

enrichment of minerals, reclamation, etc. should be envisaged; the search for the optimal scenario for the development of the field is implemented by reflecting the life cycle of the development of the field by a decomposition scheme presented in the form of a network model, and the optimization process itself involves the study of changes in the state of reserves from balance to final production. The scope of application of the given decision-making tools from the standpoint of optimal design and choice of decisions from the standpoint of isolation in space and discontinuity (continuity) in time is proposed.

**Practical implications.** The proposed sequence of implementation of the described approach in the development of comprehensive recommendations, which are reflected in the "Passport for the development of mineral deposits". Decision-making tools and software implementation are proposed.

**Keywords:** mining of mineral deposits, efficiency, engineering, software, continuity modeling, dynamic programming, parameters

## 1. ВСТУП

Відпрацювання родовищ корисних копалин – специфічний процес, ефективність якого визначається не тільки економічними показниками, але і технологічними, соціальними, екологічними чинниками, а запаси таких родовищ оцінюються з геологічної, економічної, технологічної, екологічної сторони. При цьому, об'єктивність оцінки визначається прийнятим критерієм. Критерії можуть бути різними, як то ступінь техногенного навантаження у регіоні, де ведеться видобуток [1], економічна ефективність [2], яка може виражатись собівартістю готової продукції [3], економічною надійністю [4], «гнучкістю» виробництва [5], виробничою функцією [6], показниками якості видобутої сировини [7]. І це лише перший етап, коли приймається рішення в загальному виразі, при цьому не йдеться мова про проектування циклу освоєння родовищ. Можна виділити декілька проблем, які формують актуальність та новизну наведеного дослідження:

1) Вибір інструменту прийняття рішень. На сьогодні, лише в гірництві, на практиці застосовується понад 100 інструментів прийняття рішень [8]. В роботі [9] наведено класифікацію та описано переваги та недоліки кожної групи інструментів. Варто відзначити, що кожний підхід задовольняє окремій меті, тобто рішення може бути вірним з економічної точки зору, коли буде досягнуто зменшення собівартості продукції, проте не враховано екологічні наслідки або рішення надасть загальні рекомендації щодо розміщення підприємства [10], границь відпрацювання родовища [11], проте не враховуються технологічні аспекти щодо циклу з отримання кінцевої продукції. Також, із класифікації методів прийняття рішень [9] слідує, що моделі можуть бути інформаційними, коли пошук рішення дає «якісну» відповідь, оптимізаційними – «кількісну» відповідь. Але сумісне урахування якісних і кількісних показників представляється складним. Саме тому постала проблема у розробці нових інструментів прийняття рішень щодо відпрацювання родовищ корисних копалин.

2) Комплексність. При виборі інструменту необхідно врахування економічних, екологічних, технологічних, соціальних, законодавчих, регіональних

аспектів. Отримане рішення повинно бути економічно доцільним, екологічно переважним, враховувати зв'язки між підприємствами, а також регіональні особливості, окрім цього, задовольняти вимогам чинного законодавства. Із вище наведеного слідує, що рішення потребує узгодження між «невзаємопов'язаним» (взаємовиключним) – економікою і екологією, технологією і можливостями виробництва, регіональними аспектами і соціальними потребами. Саме тому постала проблема розробки нового підходу, який враховує економічні та екологічні аспекти відпрацювання родовищ корисних копалин.

3) Технологічні аспекти фізики процесів відпрацювання родовищ корисних копалин. При відпрацюванні родовищ на технологію здійснюють вплив параметри масиву, гірничо-геологічні характеристики – саме вони визначають заходи щодо підвищення стійкості масиву гірничих порід [12], технології вилучення корисної копалини [13], додаткові заходи по боротьбі із водоприпливами, водопритокама та ін. [14], тобто, на стадії проектування технологічного процесу спорудження виробки, вилучення, транспортування корисної копалини та ін. критерієм прийняття рішень виступає не тільки «надійність», яка забезпечується додатковими заходами, але і економічна доцільність, яка впливає на вибір технології [15]. Таким чином, під час проектування технологічного процесу, який супроводжує відпрацювання родовищ корисних копалин враховуються не тільки параметри родовища, із яких впливає наявність заходів та технологій, але і економічні чинники, які визначають доцільність застосування технології. Отже, технологію відпрацювання родовищ визначають гірничо-геологічні умови, кількісні та якісні показники родовища, так і навпаки – технологія відпрацювання та пов'язані з нею економічні показники визначають якість видобутої корисної копалини, а також надійність технології. Таким чином, процеси відпрацювання родовищ входять до задач фізики гірничих процесів [16] та можуть бути вирішені на основі апробованих інструментів [17].

4) Багатоманіття різних за природою факторів, які визначають ефективність процесу. На ефективність процесу відпрацювання родовищ здійснює вплив ряд факторів, які: по-перше, різні за своєю природою; по-друге, мають різний ступінь впливу на ефективність процесу у різній відтинок часу; по-третє, можуть бути взаємовиключними; по-четверте, кількість цих факторів може коливатись від десятків до сотень. Якщо, це один фактор, то це задача лінійного програмування, два – це двовимірною поверхня, якщо три і понад – гіперповерхня. Навіть сьогодні, коли розвинуті комп'ютерні технології одночасно можна врахувати не більше шести параметрів [18], саме тому існує потреба у застосуванні декомпозиційного підходу.

5) Область застосування запропонованого рішення. Із окреслених вище проблем слідує, що отримане рішення буде оптимальним лише в окремо визначеній області, саме тому і сформована проблема дослідження, яка полягає в обґрунтуванні меж області раціонального проектування для ефективного та безпечного відпрацювання родовищ корисних копалин. Прийняте рішення буде оптимальним, але в межах області раціонального застосування запропонованого рішення. Межі цієї області визначаються гірничо-геологічними характеристиками родовища, технологією, показниками вилучення, якості корисної копалини.

б) Обсяги вилучення корисної копалини із надр. Одна із центральних проблем, коли на стадії проектування виробництва слід визначити який обсяг корисної копалини слід вилучити із надр [19], при якій ціні виробництво є економічно обґрунтованим. І тут теж на перший план виходять задачі, які пов'язані або зі збільшенням видобутку або мінімізацією збитків. Застосування класичних економічних інструментів дозволяє вирішувати задачу визначення раціонального обсягу вилучення корисної копалини незалежно від її типу, будь то золото, вугілля та ін. [20].

Таким чином, із окреслених вище шести проблем слідує, що для ефективного та безпечного відпрацювання родовищ корисних копалин слід:

1. Запропонувати інструмент прийняття рішень, який враховує багатоманіття та різновпливовість параметрів.
2. Визначити область застосування запропонованого рішення.
3. Враховувати кількісні і якісні показники видобутої сировини.
4. Запропоноване рішення повинно бути не тільки надійним, з точки зору гірничої технології, але і економічно обґрунтованим.
5. Процес прийняття рішень повинен бути швидким, а кількість витрачених обчислювальних ресурсів – мінімальна.
6. Методологія повинна бути адекватною, апробованою, не залежати від типу корисної копалини, а також стадії процесу.

Вирішенню проблеми підвищення ефективності відпрацювання родовищ корисних копалин присвячено вказане дослідження у якому сформовано актуальну наукову проблему щодо розробки наукових основ обґрунтування меж області раціонального проектування для ефективного та безпечного відпрацювання родовищ корисних копалин. Слід зазначити, що вказаний підхід узгоджується із державними програмами зі сталого природокористування, а область застосування відповідає основним науковим напрямкам Інституту фізики гірничих процесів Національної академії наук України.

## **2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ**

Метою дослідження є розробка нового підходу щодо проектування процесу економічно ефективного та екологічно безпечного відпрацювання родовищ корисних копалин.

У відповідності до сформованої актуальної наукової проблеми слід вирішити ряд задач:

- сформулювати концептуальні засади, щодо процесу освоєння родовищ корисних копалин;
- запропонувати основні методологічні підходи щодо ефективного та безпечного освоєння родовищ корисних копалин;
- розробити інструменти прийняття рішень щодо проектування процесів освоєння родовищ корисних копалин, а також навести програмну реалізацію.

Звісно, що окреслені вище задачі є загальними, тобто в межах кожної окремої вирішуються підзадачі, пов'язані із вибором інструментів, обґрунтуванням області застосування та ін.

При цьому, задачі повинні вирішуватись строго у тій послідовності у якій наведені, тобто, застосування процедури пошуку оптимального рішення є недоцільною без обґрунтування меж області раціонального проектування, а визначення меж самої області базується на кінцевій меті та обмеженнях на процес освоєння родовища корисної копалини.

Ідея полягає у обґрунтуванні меж області раціонального проектування для ефективного та безпечного відпрацювання родовищ корисних копалин шляхом дослідження зміни стану запасів.

### **3. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

У відповідності до сформульованої мети дослідження визначено, що запорукою ефективного та безпечного відпрацювання родовищ корисних копалин є обґрунтування меж області раціонального проектування.

Раціональність – розумність, доцільність, відповідність кінцевій меті, в широкому розумінні найбільш вигідний варіант [21]. Із цього визначення слідує, що область раціонального проектування включає сукупність параметрів, у нашому випадку: гірничо-геологічних, технологічних, економічних, які варто обґрунтувати.

Під параметрами розуміють постійні або незмінні для процесу величини, які можна виміряти [22]. При відпрацюванні родовищ корисних копалин параметрами можуть бути: технологічні схеми, показники виробничої діяльності та ін. Найголовніше, що ці величини є вимірюваними та є відносно постійними. Сукупність параметрів визначає властивість системи.

Процес – послідовна зміна предметів і явищ, що відбувається закономірним порядком, сукупність дій направлена на досягнення певного результату [23]. Таким чином, при видобутку корисних копалин процес «видобутку» включає послідовність дій направлених на руйнування гірничого масиву, навантаження, транспортування, збагачення корисних копалин. А, наприклад, процес управління станом гірничого масиву включає послідовність дій із доставки матеріалів, зведення тимчасового, постійного кріплення, забезпечення заходів по боротьбі з негативними проявами підземних вод та ін. Незалежно від процесу необхідно обґрунтувати межі області раціонального проектування.

Тоді, на основі наведених вище визначень можна сформулювати основні концептуальні засади обґрунтування меж області раціонального проектування.

Обґрунтування меж області раціонального проектування – процес визначення сукупності оптимальних параметрів, які супроводжують відпрацювання родовищ корисних копалин. Для відпрацювання родовищ параметрами є: технологічні схеми, технологічні ланцюжки, технології видобутку, транспортування, збагачення, переробки корисних копалин, тобто усі процеси, які супроводжують отримання кінцевої продукції.

Оптимізація – процес надання будь-чому найвигідніших, найкращих характеристик [24].

Оптимізація параметрів – процес вибору найбільш вигідних та найкращих характеристик (параметрів) процесу [25].

Параметр оптимізації – характеристика мети задана чисельною величиною, для якої слід знайти найкраще значення у межах процесу [26].

Отже, із наведених вище визначень, слідує, що для обґрунтування меж області раціонального проектування слід визначити оптимальні чисельні значення сукупності параметрів, які супроводжують процеси відпрацювання родовищ корисних копалин. Процес визначення сукупності оптимальних параметрів здійснюється за рахунок дослідження стану зміни запасів корисної копалини від балансових до кінцевої продукції [27]. Тоді, для безпечного та ефективного відпрацювання родовищ корисних копалин слід обґрунтувати характеристики процесів, тобто навести технологічні ланцюжки, технологічні схеми, показники якості сировини, визначити обсяг видобутку та ін. Для цього процесу слід навести ряд принципів, які визначають та формують наукову новизну роботи:

- Показником ефективності процесу відпрацювання родовищ корисних копалин, незалежно від її типу, є якість. Якість це філософська категорія, яка виражає сукупність ознак та властивостей, які відрізняють один предмет чи явище від інших і дають йому визначеність [28]. Для категорії «якість» дуже є одна важлива властивість – предмет не може залишаючись самим собою втратити якість, тобто якість виражає сукупність характеристик предмету, явища, системи. Таким чином, через показник «якість» розкривається сукупність характеристик, які виражаються параметрами. Більш того, цей показник ефективності є універсальним та може бути застосованим незалежно від типу корисної копалини. Для вугілля категорією «якість» є зольність, для руди – ступінь зuboжіння.

- Процес відпрацювання родовищ корисних копалин, який передбачає вилучення копалини із надр, є не завершеним, а лише є проміжною ланкою, а само підприємство (шахта, кар'єр, рудник) є складовою у ланцюжку з отримання кінцевої продукції. Тобто, процес видобутку вугілля та шахта, як підприємство з видобутку, розглядається не як окрема структура, а лише як проміжна ланка у системі генерації металу або електричної енергії. Тоді при обґрунтуванні технології у якості оптимізаційного параметру приймається не собівартість тони вугілля, продуктивність праці та ін., а наприклад, вартість виробництва 1 кіловату електричної енергії, вартість виплавки тони металу та ін.

- У відповідності до визначених вище двох принципів слідує, що обґрунтування меж області раціонального проектування реалізується процедурою представлення життєвого циклу родовища у вигляді декомпозиційної схеми, у вигляді мережевої моделі, яка відображає зміну стану запасів від балансових до кінцевої продукції. При цьому в цій схемі кожній альтернативі відповідають реальні зв'язки, оптимальному рішення відповідає найкоротший маршрут від початкової вершини до кінцевої. Пошук маршруту можна здійснювати, як в прямому та і у зворотному порядку, але обов'язковою умовою є принцип «оптимальності Р. Беллмана» [29], коли для управління на кожному кроці треба вибирати так, щоб оптимальною була сума виграшів на всіх, що залишилися до кінця процесу, кроках, включаючи виграш на даному кроці, тобто без знаходження найкращого рішення неможливо перейти до процедури пошуку оптимального рішення на наступному кроці. Кожному кроку в

процедурі пошуку оптимального рішення відповідає певний етап у життєвому циклі родовища. При цьому, можлива наявність проміжних кроків в рамках основного етапу життєдіяльності, тобто схема демонструє життєвий цикл родовища за основними етапами: розвідка, розкриття, підготовка, проходка, видобуток та ін., але при цьому можливо в рамках кожного етапу передбачати додаткові кроки, які властиві лише цьому варіанту.

- Для того, щоб уникнути «багатоманіття та незв'язності» параметрів слід застосувати декомпозиційний підхід [30]. Суть декомпозиційного підходу полягає в тому, що на кожному етапі визначається один – головний параметр, а інші – як допоміжні. Від оптимізації саме цього параметру залежить ефективність процесу в цей проміжок часу. Це дозволяє значно заощадити обчислювальні ресурси та значного пришвидшити процес прийняття рішень.

- При проектуванні технології відпрацювання родовищ корисних копалин слід поруч із економічними чинниками враховувати і екологічні. Це реалізується шляхом побудови економічної та екологічної стратегії освоєння [31]. Порівнюються між собою найбільш економічно переважна та найбільш екологічно безпечна технології освоєння [32]. При цьому, дані про безпечність технології формується на основі даних екологів та ранжується за ступенем техногенного навантаження на навколишнє середовище [33]. Сумісне урахування екологічної та економічної стратегій дозволяють для економічно переважної передбачити додаткові заходи щодо мінімізації техногенного навантаження на довкілля в регіонах, де ведеться видобуток корисної копалини.

- Обґрунтування меж області раціонального проектування базується на визначенні раціонального обсягу вилучення корисної копалини із надр. Для цього застосовуються класичні економічні підходи – маржинальний аналіз [34], критерії прийняття рішень в умовах невизначеності [35]. Сутність маржинального аналізу полягає у вивченні співвідношення обсягу продажів (випуску продукції), собівартості і прибутку завдяки прогнозуванню рівня цих величин за заданих обмежень [36]. Саме від визначення обсягу залежать і показники якості сировини, і технологічні схеми, і параметри підготовки, і черговість відпрацювання запасів. Водночас аналіз може вестись як з позиції мінімізації збитків, так і максимізації прибутків. На основі даних [20, 37] встановлено, що вказаний підхід ефективний незалежно від типу корисної копалини.

- Ефективність процесу проектування визначається інструментами, які застосовуються для прийняття рішень. Саме тому було сформовано принцип «оптимального проектування» [38]. Згідно з цим принципом оптимальність проектування визначається не тільки достовірністю запропонованого рішення, але і інструментами, які застосовані для прийняття рішень. За такої умови про доцільність судять по витраченим обчислювальним ресурсам, часу на прийняття рішень, інтерпретованістю результатів. Для обґрунтування меж області раціонального проектування слід знайти сукупність параметрів, які будуть оптимальними. Оптимізація передбачає знаходження найкращого рішення. Але, у залежності від характеристики процесу можуть бути застосовані як інструменти дискретної математики: мережеві моделі і графи, так і інструменти динамічного програмування. Для того, щоб визначитись який ін-

струмент для прийняття рішень слід застосувати, необхідно розглянути процес. Якщо він обособлений у часі та перервний, то застосовуються методи дискретної математики, а якщо необособлений у часі та безперервний, то методи динамічного програмування [39]. Наприклад, при вирішенні задачі вибору обладнання для видобутку корисної копалини достатньо альтернативні варіанти обладнання представити у вигляді мережевої моделі та на основі алгоритмів оптимізації на мережах та графах обрати найбільш оптимальний варіант за одним із параметрів (собівартість видобутку, часові витрати на обслуговування, продуктивність та ін.). Адаже процес вибору обладнання перервний у часі, передбачає обособлену процедуру. Аналогічним чином можна і обирати технологію спорудження виробок, мінімізації витрат на транспортування та ін. У разі, якщо задача полягає у проектуванні процесу безперервного у часі (видобуток та ін.) – застосовуються методи динамічного програмування. Незалежно від інструменту є загальні особливості – процес представляємо у вигляді мережевої моделі, яка має ієрархічну структуру та включає реальні зв'язки.

- Запропонований підхід є комплексним. Комплексність полягає не тільки в урахуванні економічних, екологічних чинників, а також і в наборі інструментів для вирішення завдань, які пов'язані із проектуванням процесів, які супроводжують відпрацювання.

- Кінцевим результатом раціонального проектування є «Паспорт на розробку родовищ корисної копалини». У паспорті зазначено раціональний обсяг вилучення корисної копалини, заходи із забезпечення зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище, оптимальний життєвий цикл родовища у відповідності до типу корисної копалини, технологічні схеми розробки, порядок відпрацювання запасів, загальні рекомендації із вибору обладнання, побудови технологічних ланцюжків. Розроблене авторське програмне забезпечення відповідає вказаним вимогам.

Підсумовуючи вищевикладене, можна сказати, що обґрунтування меж раціонального проектування полягає у визначенні найбільш ефективного з економічного та екологічно безпечного варіанту відпрацювання родовища корисної копалини шляхом встановлення оптимальних параметрів, які виражаються обсягом вилучення, технологічними ланцюжками, характеристиками видобувного, збагачувального, транспортного обладнання. Для ув'язки параметрів застосовується декомпозиційний підхід з формалізацією завдань на кожному етапі, шляхом дослідження стану зміни запасів (від балансових до кінцевої продукції), а для оптимізації – методи дискретної математики та динамічне програмування на максимум (мінімум).

Наведені вище принципи формують наукову та практичну новизну роботи. Далі слід навести алгоритм обґрунтування меж області раціонального проектування, а також навести процедуру прийняття оптимальних рішень.



#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Про ефективність відпрацювання родовищ корисних копалин судять за вартістю отримання кінцевої продукції, яка може бути визначена за формулою [40]:

$$C_m = \frac{100 \left[ \frac{a}{d} + \alpha(t_1 + b_1) + \alpha\beta + (t_2 + b_2) \right] f}{C \pi \rho \varphi} + t_3,$$

де  $a$  – собівартість видобутку 1 м<sup>3</sup> гірської маси, грош. од.;  $d$  – об’ємна вага корисної копалини, т/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коефіцієнт виходу руди із гірської маси, долі одиниці;  $t_1$  – витрати на перевезення 1 т руди від родовища до збагачувальної фабрики, грош. од.;  $b_1$  – витрати на збагачення 1 т руди, грош. од.;  $\beta$  – коефіцієнт виходу концентрату при збагаченні руди, долі одиниці;  $t_2$  – витрати на перевезення 1 т концентрату від збагачувальної фабрики до металургійного комбінату, грош. од.;  $b_2$  – витрати на металургійний переділ 1 т концентрату, грош. од.;  $f$  – коефіцієнт зубожіння руди, долі одиниці;  $C$  – вміст металу у рудному тілі, %;  $\pi$  – коефіцієнт вилучення металу в руді при видобутку, долі одиниці;  $\rho$  – коефіцієнт вилучення металу при збагаченні, долі одиниці;  $\varphi$  – коефіцієнт вилучення металу при металургійному переділі, долі одиниці;  $t_3$  – витрати на транспортування 1 т металу від металургійного комбінату до споживача, грош. од.

Аналогічним чином може бути представлена вартість отримання кінцевої продукції у вигляді електричної енергії, коксу та ін. Єдина умова – зв'язок між зміною запасів під час отримання кінцевої продукції, а також урахування якісних показників корисної копалини.

Процедура обґрунтування меж області раціонального проектування процесу відпрацювання родовищ корисних копалин передбачає певний алгоритм, який включає вибір та оцінку параметрів. У табл. 1 наведено алгоритм обґрунтування.

**Таблиця 1. Алгоритм обґрунтування меж області раціонального проектування для ефективного та безпечного відпрацювання родовищ корисних копалин**

№ кроку	Назва процедури	Опис процедури
1.	Визначення критерію оптимальності при розробці родовищ корисних копалин	У залежності від корисної копалини якістю може бути зольність вугілля, ступінь зубожіння руди, ступінь негативного впливу на навколишнє середовище (для родовищ рідкісних та благородних металів). У рамках цієї процедури встановлюються гранично допустимі значення вказаного критерію.

№ кроку	Назва процедури	Опис процедури
2.	Визначення обсягу вилучення корисної копалини	У залежності від показників якості корисної копалини та даних про родовище (гірничо-геологічні характеристики, вміст металу у рудному тілі) визначається обсяг вилучення корисної копалини, який дозволяє відтворити беззбитковий рівень видобутку.
3.	Проектування технологічного циклу з отримання кінцевої продукції.	Визначаються взаємозв'язки між підприємствами у системі генерації кінцевої продукції (кокс, метал, електрична енергія). У результаті виконання процедури буде знайдено оптимальне співвідношення між підприємствами з видобутку (шахта, кар'єр, розріз, рудник), збагачувальними фабриками, замикаючими підприємствами (електричні станції, металургійні комбінати).
4.	Побудова економічної та екологічної стратегій відпрацювання родовища корисної копалини	Життєвий цикл родовища представляється у вигляді декомпозиційної схеми, у вигляді мережевої моделі, у якій представлено основні етапи з отримання продукції. Кожному етапу відповідає певне рішення, яке впливає на ефективність процесу. Етапи пов'язані між собою. Кожен наступний етап є похідним від попереднього. Демонструються можливі зв'язки, які відповідають реальним технологічним рішенням. На основі побудови економічної та екологічної стратегії визначається собівартість отримання одиниці кінцевої продукції.

№ кроку	Назва процедури	Опис процедури
5.	Корегування економічної стратегії відпрацювання родовища корисної копалини (за необхідністю)	Порівнюється між собою найбільш економічно переважна стратегія отримання одиниці кінцевої продукції з найбільш безпечною з екологічної точки зору. Ступінь екологічної безпеки визначається на основі даних екологів та рангується за ступенем негативного впливу на навколишнє середовище. У разі, якщо економічно переважна стратегія не співпадає з екологічно переважною, то в економічно переважній стратегії вводяться нові (додаткові) етапи, направлені на додаткове збагачення корисної копалини.
6.	Оптимізація параметрів розробки родовищ	Визначається структура технологічного циклу з отримання кінцевої продукції. Відбувається знаходження оптимальної структури кожного циклу на етапах з отримання кінцевої продукції. Визначаються найбільш оптимальні цикли з видобутку, транспортування, збагачення, управління станом масиву та ін. Для цього застосовуються методи дискретної математики та динамічного програмування.

В результаті реалізації алгоритму, наведеного у таблиці 1, можна отримати «Паспорт відпрацювання родовища корисної копалини». В цьому паспорті будуть зазначені параметри, які дозволять інтенсифікувати процес видобутку корисної копалини з мінімальною собівартістю видобутку та найменшим ступенем негативного впливу на навколишнє середовище.

Із таблиці 1 видно, що незалежно від кроку, на кожному етапі відбувається обґрунтування параметрів. У дослідженні [41] наведено класифікацію та опис параметрів, а в [42] авторський підхід щодо оцінки та вибору.

В таблиці 2 наведено загальні рекомендації щодо оцінки та вибору параметрів.

Таблиця 2. Оцінка та вибір параметрів відпрацювання родовищ корисних копалин

Позначення	Назва рівня	Параметр
I	Стратегічний	обсяг вилучення корисної копалини, ступінь негативного впливу на навколишнє середовище
II	Інтегрований	вартість одиниці виготовленої продукції, показники якості готової продукції
III	Очисний вибій	питома собівартість видобутку, транспортування, збагачення та ін., часові витрати, продуктивність праці та ін.
IV	Технологічний	загальні витрати на цикл у рамках технологічного ланцюжку

Єдине, що необхідно це – обґрунтувати інструменти оптимізації параметрів відпрацювання родовищ корисних копалин з позиції оптимального проектування. В таблиці 3 наведено характеристику процесів, а також область застосування інструментів.

Таблиця 3. Область застосування інструментів проектування

Назва рівня	Метод	Характеристика	Параметр	Алгоритм оптимізації
стратегічний (I)	динамічного програмування, маржинальний аналіз, критерії прийняття рішень	обособлений у часі, безперервний у часі	обсяг вилучення корисної копалини	маржинальний аналіз
			ступінь негативного впливу на навколишнє середовище	критерії прийняття рішень в умовах невизначеності (максимакса, Вальда, Лапласа, Севіджа, Гурвіца) Р. Белмана [43]

Назва рівня	Метод	Характеристика	Параметр	Алгоритм оптимізації
інтегрований (II)	динамічного програмування	обособлений, безперервний у часі	вартість виготовленої продукції, показники якості	Р. Белмана
очисний вибір (III)	дискретної математики	перервний	вибір обладнання для видобутку, транспортування, збагачення	Дейкстри [44]
			впорядкування структури обладнання	Флойда [45]
			збільшення продуктивності праці, мінімізація собівартості	Дейкстри
технологічний (IV)	дискретної математики	перервний	загальні витрати на цикл у рамках технологічного ланцюжку	Дейкстри

В роботі [46] наведено процедуру оптимізації параметрів відпрацювання родовищ корисних копалин на основі застосування методів дискретної математики, в [47] – динамічного програмування, [48] – розробки рекомендацій щодо вибору обладнання, [49] – модернізації вугледобувної галузі, [50] – зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище, де ведеться видобуток корисних копалин.

Єдине, що варто відмітити, що незалежно від параметру та відповідної йому задачі в Інституті фізики гірничих процесів Національної академії наук України створено відповідне програмне забезпечення, яке дозволяє реалізувати процес проектування при відпрацюванні родовищ корисних копалин (табл. 4).

**Таблиця 4. Програмне забезпечення для проектування процесів відпрацювання родовищ корисних копалин**

Задача	Назва програми
Визначення раціонального обсягу вилучення корисної копалини із надр	Комп'ютерна програма "Програма визначення рівня виробництва продукції з надр" ("Rational LP.v1.2020")
Мінімізація ризиків виробництва	Програма вибору критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності ("Kriteriy.v2_2019")

Задача	Назва програми
Побудова економічної стратегії освоєння родовища корисної копалини	Комп'ютерна програма "Програма динамічного програмування альтернативного графу на мінімум" ("Din_Min.v2_2019")
Побудова екологічної стратегії освоєння родовища корисної копалини	Комп'ютерна програма "Програма динамічного програмування альтернативного графу на мінімум" ("Din_Min.v2_2019")
Впорядкування технологічного циклу	Комп'ютерна програма «Програма знаходження найкоротших відстаней між усіма вершинами мережевої моделі» («GraphON.v1.2017»)
Визначення оптимальної структури технологічного циклу	Комп'ютерна програма «Програма знаходження найкоротших відстаней між усіма вершинами мережевої моделі» («GraphON.v1.2017»)
Вибір гірничо-шахтного обладнання	Комп'ютерна програма «Програма вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання на основі універсальних графів» («CountsCEM.v1.p2.6_c25»)

В результаті проведеного дослідження запропоновано область застосування підходів, наведено інструменти прийняття рішень, наведено алгоритм обґрунтування параметрів проєктування при відпрацюванні родовищ корисних копалин.

## 5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розроблене програмне забезпечення, а також запропоновані рекомендації формують практичну значимість роботи. У загальному визначенні процедура обґрунтування параметрів (у вигляді проєкту) може бути реалізована наступним чином:

1. Робота починається з обґрунтування методики дослідження. На першому етапі формуються основні підходи до проєктування процесів освоєння родовищ критичних та стратегічних мінеральних ресурсів. На основі встановлених підходів визначається ефективний сценарій відпрацювання корисних копалин із мінімізацією негативного впливу виробництва на навколишнє середовище із залученням сучасних інформаційних технологій. Наразі є можливості та програмне забезпечення для визначення раціонального обсягу виробництва, оптимізації параметрів виробництва, проведення порівняльного аналізу.

2. Отримані підходи, а також наявне програмне забезпечення дозволить отримати методологію обґрунтування області ефективної експлуатації

альтернативними ліцензіатами з різними правами на користування надрами і різними можливостями по фінансам, трудовим і матеріальним ресурсам.

3. Після цього буде досліджено новий спосіб розробки екологічних сценаріїв розвитку територій на базі економічної оцінки екологічного аспекту освоєння родовищ критичних та стратегічних мінеральних копалин з урахуванням виробленої кінцевої продукції.

4. Після цього розробляються технології, які супроводжують відпрацювання родовищ.

5. Результатом виконання проекту є інноваційна технологія проектування, яка дозволяє отримати комплексне рішення у вигляді «Паспорту інтенсифікації гірничо-збагачувальних процесів при розробці родовища корисних копалин», який містить економічну, екологічну стратегії освоєння, набір рекомендацій для впровадження стратегій у виробництво, які включають кількість та якість видобутої корисної копалини, технологічні ланцюжки обладнання, схеми доставки, видобутку та ін.

Характерною особливістю проекту є те, що він є комплексним, містить в собі не тільки методологічну базу до розробки стратегії відпрацювання родовищ, але і включає в себе технологічні схеми та рішення для впровадження оптимальної стратегії. Запропоновані рекомендації базуються на проведенні фундаментальних досліджень щодо геомеханічних характеристик масиву гірничих порід, процесів фільтрації в масивах гірничих порід під час видобутку корисних копалин в складних гідрогеологічних умовах, хімічної взаємодії відходів виробництва з навколишнім середовищем [51, 52].

Отже, представле дослідження є комплексним та поєднує в собі як екологічні так і економічні аспекти раціонального, комплексного і екологічно безпечного освоєння родовищ критичних та стратегічних мінеральних ресурсів, що дозволяє реалізувати державну політику у сфері природокористування. Базою для реалізації шляхом створення сучасних технологій інтенсифікації видобутку корисних копалин є новітні інструменти та підходи, які відповідають потребам держави, а також узгоджуються зі світовими трендами у проектуванні процесів освоєння родовищ. Все це дозволило в результаті виконання проекту створити новий підхід до вирішення багатопараметричних задач, які супроводжують процеси, пов'язані з освоєнням родовищ корисних копалин.

## **6. ВИСНОВКИ**

В процесі виконання дослідження вирішено актуальну наукову проблему, яка полягає в обґрунтуванні меж області раціонального проектування для ефективного та безпечного відпрацювання родовищ корисних копалин. Отримано важливі наукові результати, які можна сформулювати наступним чином:

1. Для обґрунтування меж області раціонального проектування слід визначити оптимальні чисельні значення сукупності параметрів, які супроводжують процеси відпрацювання родовищ корисних копалин. Процес визначення сукупності оптимальних параметрів здійснюється за рахунок дослідження

стану зміни запасів корисної копалини від балансових до кінцевої продукції. Тоді, для безпечного та ефективного відпрацювання родовищ корисних копалин слід обґрунтувати характеристики процесів, тобто навести технологічні ланцюжки, технологічні схеми, показники якості сировини, визначити обсяг видобутку та ін.

2. Сформовано концептуальні засади ефективного відпрацювання родовищ корисних копалин, згідно яких – критерієм оптимальності є якість, яка виражається зольністю, ступенем зубожіння, негативного впливу на навколишнє середовище; проектування процесів починається з визначення обсягу вилучення корисної копалини із надр; при проектуванні слід аналізувати економічну та екологічну стратегії відпрацювання, при цьому у разі невідповідності економічно переважної стратегії екологічно безпечній слід передбачити додаткові етапи зі збагачення корисної копалини, рекультивації та ін.; пошук оптимального сценарію відпрацювання родовища реалізується шляхом відображення життєвого циклу родовища у вигляді декомпозиційної схеми, представленої у вигляді мережевої моделі, а сам процес оптимізації передбачає дослідження зміни стану запасів від балансових до кінцевої продукції.

3. Обґрунтування меж області раціонального проектування включає в себе визначення параметрів при яких буде відтворено заданий обсяг вилучення корисної копалини шляхом встановлення оптимальних зв'язків під час експлуатації технологічних схем шляхом вибору та оцінки параметрів. При цьому, процес відпрацювання родовища, а також кінцевий результат у вигляді обсягу вилученої корисної копалини, розглядається як проміжна ланка в системі генерації кінцевої продукції. Таким чином, ефективність підприємства з видобутку корисної копалини: шахти, рудника, кар'єру, розрізу та ін., визначається не собівартістю видобутку 1 т корисної копалини, а собівартістю отримання одиниці кінцевої продукції (кіловат електроенергії, вартість тони металу, вартість отримання тони коксу та ін.).

4. Оптимізація процесів, які супроводжують відпрацювання родовищ корисних копалин, відбувається за рахунок зміни стану запасів. При відпрацюванні родовищ на технологію здійснює вплив параметри масиву, гірничо-геологічні характеристики – саме вони визначають заходи щодо підвищення стійкості масиву гірничих порід, технології вилучення корисної копалини, додаткові заходи по боротьбі із водопріпливами, водопритоками та ін., тобто, на стадії проектування технологічного процесу спорудження виробки, вилучення, транспортування корисної копалини та ін. критерієм прийняття рішень виступає не тільки «надійність», яка забезпечується додатковими заходами, але і економічна доцільність, яка впливає на вибір технології. Таким чином, під час проектування технологічного процесу, який супроводжує відпрацювання родовищ корисних копалин, враховуються не тільки параметри родовища, із яких впливає наявність заходів та технологій, але і економічні чинники, які визначають доцільність застосування технології. Отже, технологію відпрацювання родовищ визначають гірничо-геологічні умови, кількісні та якісні показники родовища, так і навпаки – технологію відпрацювання та пов'язані з нею економічні показники, визначають якість видобутої корисної копалини, а також надійність технології. Таким чином, процеси відпрацю-



вання родовищ входять до задач фізики гірничих процесів та можуть бути вирішені на основі апробованих інструментів, які представлені у вказаному дослідженні.

5. На ефективність процесу проектування впливають інструменти прийняття рішень. Було сформовано визначення «оптимального проектування» згідно якого, ефективність процесу прийняття рішень визначається не тільки достовірністю отриманого рішення, але і інтерпретованістю, швидкістю прийняття. Запропоновано для проектування застосовувати методи дискретної математики та динамічного програмування, при цьому, для вибору підходу слід надати характеристику процесу: якщо процес обособлений у часі та перервний, то застосовують методи дискретної математики: мережеві моделі та графи, в разі, якщо процес безперервний та необособлений, то застосовуються методи динамічного програмування. В роботі наведено співвідношення між задачами проектування у вигляді ієрархічної структури, яка включає чотири рівні (стратегічний, інтегрований, очисний вибій, технологічний), які формують алгоритм проектування процесу відпрацювання родовищ.

6. В результаті реалізації наведених підходів можна отримати «Паспорт відпрацювання родовища корисної копалини». В цьому паспорті будуть зазначені параметри, які дозволять інтенсифікувати процес видобутку корисної копалини з мінімальною собівартістю видобутку та найменшим ступенем негативного впливу на навколишнє середовище. Застосування розробленого програмного забезпечення дозволить впровадити результати дослідження у виробництво.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Khorolskyi, A., Hrinov V. & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 6(3), 463–471.
2. Гринев, В. & Хорольский, А. (2019). Моделирование сценария освоения месторождений ценных руд на условиях динамического программирования. *II Бекжановские чтения: материалы международной конференции*, Алматы, Республика Казахстан, 114–119.
3. Babets, Ye.K., Adamchuk, A.A., Shustov, O.O., Anisimov, O.O., & Dmytruk, O.O. (2020). Determining conditions of using draglines in single-tier internal dump formation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 5–14. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/005>
4. Salli, S., Mamaykin, O., & Smolanov, S. (2013). Inner potential of technological networks of coal mines. *Mining of Mineral Deposits*, 243–246.
5. ElMaraghy, H.A. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International journal of flexible manufacturing systems*, 17(4), 261–276.
6. Felipe, J., & Adams, F.G. (2005). "A theory of production" the estimation of the Cobb-Douglas function: A retrospective view. *Eastern Economic Journal*, 31(3), 427–445.
7. Хорольський, А. & Гринев, В. (2020) Оцінка і вибір параметрів при розробці родовищ корисних копалин. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*, (22), 118–140. <https://doi.org/10.37101/ftpgp22.01.009>
8. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Fomychova, L. (2020). Research into optimization model for balancing the technological flows at mining enterprises. *E3S Web Of Conferences*, 201, 01030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101030>

9. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2018). Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment. In *E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering*. (Vol. 60. p. 00017). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2018600017>
10. Saaty, T.L. (2014). Analytic heirarchy process. *Wiley statsRef: Statistics reference online*.
11. Mamaykin, O. (2015). On the problem of operation schedule reliability improvement in mines. *New Developments in Mining Engineering*, 505–508.
12. Хорольский, А.А., & Гринев, В.Г. (2020). Оптимизация параметров крепления выработок в сложных гидрогеологических условиях. *Геология и охрана недр*, (3), 53–59.
13. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Demchenko, Yu. (2019). Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 53–62. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.053>
14. Хорольский, А.А., & Гринев, В.Г. (2020). Разработка нового подхода для выбора способа крепления выработок. *Горная механика и машиностроение*, (3), 27–36.
15. Salli, S., Pochepov, V., & Mamaykin, O. (2014). Theoretical aspects of the potential technological schemes evaluation and their susceptibility to innovations. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 491–496.
16. Хорольский, А.А., & Гринев, В.Г. (2020). Возможности создания новой технологии оптимального проектирования природопользования. *Горно-геологический журнал*, (61), 4–12.
17. Гринев, В.Г., & Хорольский, А.А. (2017). Система поддержки принятия решений при разработке месторождений полезных ископаемых. *Горно-геологический журнал*, 51(3), 18–24.
18. Сынков, В.Г., Гринев, В.Г., & Хорольский, А.А. (2016). Оценка уровня взаимосвязи очистного оборудования в составе механизированного комплекса. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*, (1), 124–131.
19. Хорольський, А. & Грінюв, В. (2020). Визначення раціонального обсягу вилучення корисних копалин із надр: маржинальний підхід. *Економіка промисловості*, 3(91), 82–95. <https://doi.org/10.15407/econindustry2020.03.082>
20. Грінюв, В.Г., & Хорольський, А.О. (2020). Дослідження основ технології оптимального проектування раціонального користування родовищами цінних копалин. *Мінеральні ресурси України*, 2, 19–24. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.2.19-24>
21. *Философия: Энциклопедический словарь*. (2004). Гардарики, 550 с.
22. *Математический энциклопедический словарь*. (1995). Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 847 с.
23. *Методология: словарь системы основных понятий*. (2013). Либроком, 208 с.
24. Du, D.Z., Pardalos, P.M., & Wu, W. (2008). "History of Optimization". In Floudas, C.; Pardalos, P. (eds.). *Encyclopedia of Optimization*. Boston: Springer, 1538–1542.
25. Li-Ping, Z., Huan-Jun, Y., & Shang-Xu, H. (2005). Optimal choice of parameters for particle swarm optimization. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 6(6), 528–534.
26. Stewart, J.J. (2013). Optimization of parameters for semiempirical methods VI: more modifications to the NDDO approximations and re-optimization of parameters. *Journal of molecular modeling*, 19(1), 1–32.
27. Гринев, В. (1992). *Решение проблем разработки рудных месторождений Севера*. Новосибирск: ВО «Наука», 205 с.

28. Leitch, C.M., Hill, F.M., & Harrison, R.T. (2010). The philosophy and practice of interpretivist research in entrepreneurship: Quality, validation, and trust. *Organizational Research Methods*, 13(1), 67–84.
29. O'Donoghue, B., Osband, I., Munos, R., & Mnih, V. (2018, July). The uncertainty bellman equation and exploration. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 3836–3845).
30. Carter, J., & Heinrich, G. (2011). SecDec: A general program for sector decomposition. *Computer Physics Communications*, 182(7), 1566–1581.
31. Гринев, В., Изаков, В. & Зубков, В. (1999). *Решение горных задач на ЭВМ при освоении рудных месторождений*. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 215 с.
32. Гриньов, В. & Хорольський, А. (2019). Оптимальне проектування параметрів гірничозбагачувальних підприємств для раціонального освоєння цінних родовищ України. *Физико-технические проблемы горного производства*. (21), 124–145.
33. Гриньов, В.Г. & Хорольський, А.О. (2018). Можливості ефективного освоєння рудних родовищ із запасами рідкісних і благородних металів. *Физико-технические проблемы горного производства*, (20), 113–122.
34. Гриньов, В., Хорольський, А. & Каліущенко, О. (2019). Розроблення екологічних сценаріїв ефективного освоєння цінних родовищ корисних копалин. *Мінеральні ресурси України*, (2), 46–50. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.2.46-50>
35. Хорольський, А. & Гриньов, В., (2018). Проектування технологічних схем гірничого виробництва в умовах невизначеності. *Физико-технические проблемы горного производства*, (20), 132–146.
36. Delis, M., Iosifidi, M., & Tsionas, E.G. (2014). On the estimation of marginal cost. *Operations Research*, 62(3), 543–556.
37. Хорольський, А.А., & Гринев, В.Г. (2021). Новые подходы к проектированию процессов освоения месторождений полезных ископаемых. In *Самтаевские чтения-2021*, 682–686.
38. Хорольський, А.А., & Гринев, В.Г. (2020). Модели и методы оптимального проектирования для освоения месторождений полезных ископаемых. In *Информационные технологии в образовании, науке и производстве*, 342–349.
39. Гриньов, В.Г., Хорольський, А.О., & Мамайкін, О.Р. (2019). Оцінка стану та оптимізація параметрів технологічних схем вугільних шахт. *Вісник Криворізького національного університету*, (48), 31–37. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2019-1-48-31-37>
40. Панфилов, Е.И. (2011). Классификация источников изменений качества твердых полезных ископаемых при их добыче. *Горная промышленность*, (3), 16–20.
41. Хорольський, А.А., & Гринев, В.Г. (2019). Оптимальное проектирование параметров горного производства. In *Информационные технологии в образовании, науке и производстве*, 459–465.
42. Хорольський, А.О. (2020). Концептуальні засади раціонального використання природних ресурсів. In *Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів*, 35–40.
43. Dreyfus, S. (2002). Richard Bellman on the birth of dynamic programming. *Operations Research*, 50(1), 48–51.
44. Tan, G.Z., He, H., & Aaron, S. (2006). Global optimal path planning for mobile robot based on improved Dijkstra algorithm and ant system algorithm. *Journal of Central South University of Technology*, 13(1), 80–86.
45. Wei, D. (2010). An optimized floyd algorithm for the shortest path problem. *Journal of Networks*, 5(12), 1496.

46. Сынков, В.Г., Гринев, В.Г., & Хорольский, А.А. (2016). Применение базовых алгоритмов оптимизации для выбора очистного оборудования. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*, (2), 117–124.
47. Хорольский, А.А., & Гринев, В.Г. (2018). Использование динамического программирования для проектирования горного производства при ограниченных ресурсах. In *Информационные технологии в образовании, науке и производстве*: access: <http://rep.bntu.by/handle/data/49907>
48. Гринев, В.Г., & Хорольский, А.А. (2018). Проектирование технологических схем очистного оборудования с использованием сетевых моделей: опыт и перспективы. *Горная механика и машиностроение*, (4), 12–21.
49. Хорольський, А.О., Грінюв, В.Г., & Мамайкін, О.Р. (2019). Інноваційні перспективи підземної експлуатації вугільних родовищ. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*, 1(83), 289–298. [https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-289-298](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-289-298)
50. Хорольский, А.А., & Гринев, В.Г. (2018). Выбор сценария освоения месторождений полезных ископаемых. *Геология и охрана недр*, (3), 68–74.
51. Starodub, G., Karabyn, V., Ursulyak, P., & Pyroszok, S. (2013). Assessment of anthropogenic changes natural hydrochemical pool Western Bug River. *Studia regionalne i lokalne Polski Poludniowo-Wschodniej*, 11, 79–90.
52. Pavluk, M., Ya, L., & Karabyn, V. (2016). Geochemical aspects of ecology safety of drilling of oil and gas wells in the Southern Boryslav area of Precarpatia. *Geology and geochemistry of combustible minerals*, 1–2.

## REFERENCES

1. Khorolskyi, A., Hrinov V. & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 6(3), 463–471.
2. Grinev, V. & Horol'skij, A. (2019). Modelirovanie scenariya osvoeniya mestorozhdenij cennyh rud na usloviyah dinamicheskogo programmirovaniya. In *II Bekzhanovskie chteniya*, 11–119.
3. Babets, Ye.K., Adamchuk, A.A., Shustov, O.O., Anisimov, O.O., & Dmytruk, O.O. (2020). Determining conditions of using draglines in single-tier internal dump formation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 5–14. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/005>
4. Salli, S., Mamaykin, O., & Smolanov, S. (2013). Inner potential of technological networks of coal mines. *Mining of Mineral Deposits*, 243–246.
5. ElMaraghy, H.A. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International journal of flexible manufacturing systems*, 17(4), 261–276.
6. Felipe, J., & Adams, F.G. (2005). "A theory of production" the estimation of the Cobb-Douglas function: A retrospective view. *Eastern Economic Journal*, 31(3), 427–445.
7. Khorolskyi, A. & Hrynov, V. (2020) Otsinka i vybir parametriv pry rozrobtsti rodovyschch korysnykh kopalyn. *Fyzyko-tekhnicheskyye problemy hornoho proyzvodstva*, (22), 118–140. <https://doi.org/10.37101/ftpgp22.01.009>
8. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Fomychova, L. (2020). Research into optimization model for balancing the technological flows at mining enterprises. *E3S Web Of Conferences*, 201, 01030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101030>
9. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2018). Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment. In *E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering*. (Vol. 60. p. 00017). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017>

10. Saaty, T.L. (2014). Analytic hierarchy process. *Wiley statsRef: Statistics reference online*.
11. Mamaykin, O. (2015). On the problem of operation schedule reliability improvement in mines. *New Developments in Mining Engineering*, 505–508.
12. Khorolskyi, A.A., & Grinev, V.G. (2020). Optimizaciya parametrov krepleniya vyrabotok v slozhnyh gidrogeologicheskikh usloviyah. *Geologiya i ohrana nedr*, (3), 53–59.
13. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Demchenko, Yu. (2019). Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 53–62. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.053>
14. Khorolskyi, A.A., & Grinev, V.G. (2020). Razrabotka novogo podhoda dlya vybora sposoba krepleniya vyrabotok. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie*, (3), 27–36.
15. Salli, S., Pochepov, V., & Mamaykin, O. (2014). Theoretical aspects of the potential technological schemes evaluation and their susceptibility to innovations. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 491–496.
16. Khorolskyi, A.A., & Grinev, V.G. (2020). Vozmozhnosti sozdaniya novoj tekhnologii optimal'nogo proektirovaniya prirodopol'zovaniya. *Gorno-geologicheskij zhurnal*, (61), 4–12.
17. Grinev, V.G., & Khorolskyi, A.A. (2017). Sistema podderzhki prinyatiya reshenij pri razrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. *Gorno-geologicheskij zhurnal*, 51(3), 18–24.
18. Synkov, V.G., Grinev, V.G., & Khorolskyi, A.A. (2016). Ocenka urovnya vzaimosvyazi ochistnogo oborudovaniya v sostave mekhanizirovannogo kompleksa. *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Informatika, kibernetika ta obchislyval'na tekhnika*, (1), 124–131.
19. Khorolskyi, A. & Grin'ov, V. (2020). Vznachennya racional'nogo obsyagu viluchennya korisnih kopalin iz nadr: marzhinal'nij pidhid. *Ekonomika promislovosti*, 3(91), 82–95. <https://doi.org/10.15407/econindustry2020.03.082>
20. Grin'ov, V.G., & Khorolskyi, A.O. (2020). Doslidzhennya osnov tekhnologii optimal'nogo proektuvannya racional'nogo koristuvannya rodovishchami cinnih kopalin. *Mineral'ni resursi Ukrainy*, 2, 19–24. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.2.19-24>
21. *Filosofiya: Enciklopedichnij slovar'*. (2004). Gardariki, 550 p.
22. *Matematicheskij enciklopedicheskij slovar'*. (1995). Nauchnoe izdatel'stvo «Bol'shaya Rossijskaya enciklopediya», 847 p.
23. *Metodologiya: slovar' sistemy osnovnyh ponyatij*. (2013). Librokom, 208 p.
24. Du, D.Z., Pardalos, P.M., & Wu, W. (2008). "History of Optimization". In Floudas, C.; Pardalos, P. (eds.). *Encyclopedia of Optimization*. Boston: Springer, 1538–1542.
25. Li-Ping, Z., Huan-Jun, Y., & Shang-Xu, H. (2005). Optimal choice of parameters for particle swarm optimization. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 6(6), 528–534.
26. Stewart, J.J. (2013). Optimization of parameters for semiempirical methods VI: more modifications to the NDDO approximations and re-optimization of parameters. *Journal of molecular modeling*, 19(1), 1–32.
27. Grinev, V. (1992). *Reshenie problem razrabotki rudnyh mestorozhdenij Severa*. Novosibirsk, Nauka, 205.
28. Leitch, C.M., Hill, F.M., & Harrison, R.T. (2010). The philosophy and practice of interpretivist research in entrepreneurship: Quality, validation, and trust. *Organizational Research Methods*, 13(1), 67–84.
29. O'Donoghue, B., Osband, I., Munos, R., & Mnih, V. (2018, July). The uncertainty bellman equation and exploration. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 3836–3845).

30. Carter, J., & Heinrich, G. (2011). SecDec: A general program for sector decomposition. *Computer Physics Communications*, 182(7), 1566–1581.
31. Hrynev, V., Yzakson, V. & Zubkov, V. (1999). *Reshenye hornykh zadach na EVM pry osvoenyy rudnykh mestorozhdeniy*. Novosybyrsk: Nauka, Sybyrskaya yzdatelskaia fyрма RAN, 215 p.
32. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2019). Optymalne proektuvannia parametriv hirnychoz-bahachuvalnykh pidpriumstv dlia ratsionalnogo osvoiennia tsinnykh rodovyshch Ukrainy. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornoho proyzvodstva*. (21), 124–145.
33. Hrinov, V.H. & Khorolskyi, A.O. (2018). Mozhlyvosti efektyvnoho osvoiennia rudnykh rodovyshch iz zapasamy ridkisnykh i blahorodnykh metaliv. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornoho proyzvodstva*, (20), 113–122.
34. Hrinov, V., Khorolskyi, A. & Kaliushhenko, O. (2019). Rozroblennja ekologichnykh scenarii v efektyvnoho osvoiennia cinnnykh rodovyshch korysnykh kopalyn. *Mineral'ni resursy Ukrai'ny*, (2), 46–50. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.2.46-50>
35. Khorolskyi, A. & Hrinov, V., (2018). Proektuvannia tekhnolohichnykh skhem hirnychoho vyrobnytstva v umovakh nevyznachenosti. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornoho proyzvodstva*, (20), 132–146.
36. Delis, M., Iosifidi, M., & Tsionas, E. G. (2014). On the estimation of marginal cost. *Operations Research*, 62(3), 543–556.
37. Khorolskyi, A.A., & Grinev, V.G. (2021). Novye podhody k proektirovaniyu processov osvoeniya mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh. In *Satpaevskie chteniya-2021*, 682–686.
38. Khorolskyi, A.A., & Grinev, V.G. (2020). Modeli i metody optimal'nogo proektirovaniya dlya osvoeniya mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh. In *Informacionnye tekhnologii v obrazovanii, nauke i proyzvodstve*, 342–349.
39. Hrinov, V.H., Khorolskyi, A.O., & Mamaikin, O.R. (2019). Otsinka stanu ta optymizatsiia parametriv tekhnolohichnykh skhem vuhilnykh shakht. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnogo universytetu*, (48), 31–37. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2019-1-48-31-37>
40. Panfilov, E.I. (2011). Klassifikaciya istochnikov izmenenij kachestva tverdykh poleznykh iskopaemykh pri ih dobyche. *Gornaya promyshlennost'*, (3), 16–20.
41. Khorolskyi, A.A., & Grinev, V.G. (2019). Optimal'noe proektirovanie parametrov gornogo proyzvodstva. In *Informacionnye tekhnologii v obrazovanii, nauke i proyzvodstve*, 459–465.
42. Khorolskyi, A.O. (2020). Kontseptualni zasady ratsionalnogo vykorystannia pryrodnykh resursiv. In *Perspektyvy rozvytku hirnychoi spravy ta ratsionalnogo vykorystannia pryrodnykh resursiv*, 35–40.
43. Dreyfus, S. (2002). Richard Bellman on the birth of dynamic programming. *Operations Research*, 50(1), 48–51.
44. Tan, G.Z., He, H., & Aaron, S. (2006). Global optimal path planning for mobile robot based on improved Dijkstra algorithm and ant system algorithm. *Journal of Central South University of Technology*, 13(1), 80–86.
45. Wei, D. (2010). An optimized floyd algorithm for the shortest path problem. *Journal of Networks*, 5(12), 1496.
46. Synkov, V.G., Grinev, V.G., & Khorolskyi, A.A. (2016). Primenenie bazovykh algoritmov optimizatsii dlya vybora ochistnogo oborudovaniya. *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Informatika, kibernetika ta obchislyval'na tekhnika*, (2), 117–124.
47. Khorolskyi, A.A., & Grinev, V.G. (2018). Ispol'zovanie dinamicheskogo programmirovaniya dlya proektirovaniya gornogo proyzvodstva pri ogranichennykh

resursah. In *Informacionnye tekhnologii v obrazovanii, nauke i proizvodstve*: access: <http://rep.bntu.by/handle/data/49907>

48. Grinev, V.G., & Khorolskiy, A.A. (2018). Proektirovanie tekhnologicheskikh skhem ochistnogo oborudovaniya s ispol'zovaniem setevykh modelej: opyt i perspektivy. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie*, (4), 12–21.

49. Khorolskiy, A.O., Hrinov, V.H., & Mamaikin, O.R. (2019). Innovatsiini perspektivy pidzemnoi ekspluatatsii vuhilnykh rodovyshch. *Visnyk ZhDTU. Seriya "Tekhnichni nauky"*, 1(83), 289–298. [https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-289-298](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-289-298)

50. Khorolskiy, A.A., & Grinev, V.G. (2018). Vybory scenariya osvoiniya mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh. *Geologiya i ohrana neдр*, (3), 68–74.

51. Starodub, G., Karabyn, V., Ursulyak, P., & Pyroszok, S. (2013). Assessment of anthropogenic changes natural hydrochemical pool Western Bug River. *Studia regionalne i lokalne Polski Poludniowo-Wschodniej*, 11, 79–90.

52. Pavluk, M., Ya, L., & Karabyn, V. (2016). Geochemical aspects of ecology safety of drilling of oil and gas wells in the Southern Boryslav area of Precarpatia. *Geology and geochemistry of combustible minerals*, 1–2.

## **ABSTRACT (IN UKRAINIAN)**

**Мета.** Розробити новий підхід, щодо проектування процесу економічно ефективного та екологічно безпечного відпрацювання родовищ корисних копалин.

**Методика.** Технічне завдання на розробку проекту ефективного відпрацювання родовищ корисних копалин передбачає обґрунтування меж області раціонального проектування, яка визначає оптимальні чисельні значення сукупності параметрів, що характеризують процеси освоєння родовищ. Процедура визначення оптимальних параметрів здійснюється за рахунок дослідження стану зміни запасів корисної копалини від балансових до кінцевої продукції у вигляді єдиної складної системи із взаємопов'язаних елементів технологічних ланцюжків, технологічних схем, показників якості сировини та її обсягів.

**Результати.** Запропоновано алгоритм проектування процесу відпрацювання родовищ корисних копалин. У алгоритмі зазначено співвідношення між задачами проектування у вигляді ієрархічної структури, яка включає чотири рівні (стратегічний, інтегрований, очисний вибір, технологічний), що формують задачі проектування даного процесу. Незалежно від типу корисної копалини задачі проектування передбачають оптимізацію процесів, яка реалізується на основі декомпозиційного підходу.

**Наукова новизна.** Сформовано концептуальні засади ефективного відпрацювання родовищ корисних копалин, згідно яких критерієм оптимальності є якість, яка виражається зольністю, ступенем зубожіння, негативного впливу на навколишнє середовище; проектування процесів починається з визначення обсягу вилучення корисної копалини із надр; проект включає економічну та екологічну стратегії відпрацювання, при цьому у разі невідповідності економічно переважної стратегії екологічно безпечній слід передбачити додаткові етапи зі збагачення корисної копалини, рекультивациі та ін.; пошук оптимального сценарію відпрацювання родовища реалізується шляхом відображення

життєвого циклу освоєння родовища декомпозиційною схемою, представленої у вигляді мережевої моделі, а сам процес оптимізації передбачає дослідження зміни стану запасів від балансових до кінцевої продукції. Запропоновано область застосування наведених інструментів прийняття рішень з позиції оптимального проектування та вибору рішень з позиції обособленості у просторі та перервності (безпервності) у часі.

**Практична значимість.** Наведено послідовність впровадження описаного підходу при розробці комплексних рекомендацій, які відображені у «Паспорті на відпрацювання родовищ корисних копалин». Запропоновано інструменти прийняття рішень, а також програмну реалізацію.

**Ключові слова:** відпрацювання родовищ, ефективність, проектування, комп'ютерна програма, моделювання сценаріїв, динамічне програмування, параметр

#### ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель.** Разработать новый подход к проектированию процесса экономически эффективной и экологически безопасной разработки месторождений полезных ископаемых.

**Методика.** Техническое задание на разработку проекта эффективной разработки месторождений полезных ископаемых предусматривает обоснование границ области рационального проектирования, которая определяет оптимальные численные значения совокупности параметров, характеризующих процессы освоения месторождений. Процедура определения оптимальных параметров осуществляется за счет исследования состояния изменения запасов полезного ископаемого от балансовых к конечной продукции в виде единой сложной системы из взаимосвязанных элементов технологических цепочек, технологических схем, показателей качества сырья и его объемов.

**Результаты.** Предложен алгоритм проектирования процесса разработки месторождений полезных ископаемых. В алгоритме указано соотношение между задачами проектирования в виде иерархической структуры, которая включает четыре уровня (стратегический, интегрированный, очистной забой, технологический), формирующие задачи проектирования данного процесса. Независимо от типа полезного ископаемого, задачи проектирования предусматривают оптимизацию процессов, которая реализуется на основе декомпозиционного подхода.

**Научная новизна.** Сформированы концептуальные основы эффективной разработки месторождений полезных ископаемых, согласно которым критерием оптимальности является качество, которое выражается зольностью, степенью разубоживания, негативного воздействия на окружающую среду; проектирование процессов начинается с определения объема извлечения полезного ископаемого из недр; проект включает экономическую и экологическую стратегии отработки, при этом в случае несоответствия экономически преимущественной стратегии безопасной следует предусмотреть дополнительные этапы по обогащению полезных ископаемых, рекультивации и др.; поиск оптимального сценария разработки месторождения реализуется путем отражения жизненного цикла освоения месторождения декомпозиционной схемой,



представленной в виде сетевой модели, а сам процесс оптимизации предполагает исследование изменения состояния запасов от балансовых до конечной продукции. Предложена область применения приведенных инструментов принятия решений с позиции оптимального проектирования и выбора решений с позиции обособленности в пространстве и прерывности (непрерывности) во времени.

**Практическая значимость.** Предложенная последовательность внедрения описанного подхода при разработке комплексных рекомендаций, которые отражены в «Паспорте на разработку месторождений полезных ископаемых». Предложены инструменты принятия решений, а также программная реализация.

**Ключевые слова:** разработка месторождений, эффективность, проектирование, компьютерная программа, моделирование сценариев, динамическое программирование, параметр

#### **ABOUT AUTHOR**

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