

ГІРНИЦТВО

УДК 622.271

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-27>

ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПЛАНУВАННЯ ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ MICROMINE BEYOND

Баряцька Наталія Василівна,

доктор геологічних наук,

директор

ТОВ «Софтмайн»

ORCID ID: 0000-0002-8068-2464

Scopus ID: 57210748729

Луценко Сергій Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри відкритих гірничих робіт

Криворізького національного університету

ORCID ID: 0000-0002-5992-3622

Scopus ID: 58538175900

Григор'єв Юліан Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри відкритих гірничих робіт

Криворізького національного університету

ORCID ID: 0000-0002-1780-5759

Scopus ID: 56672738900

Плотніков Олександр Володимирович,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри геології та екології

Криворізького національного університету

ORCID ID: 0000-0001-5477-734X

Scopus ID: 56416294500

Сафронова Ніна Геннадіївна,

менеджер проєктів

ТОВ «Софтмайн»

ORCID ID: 0009-0002-4022-2380

У статті розглянута розробка родовищ відкритим способом від оптимізації контуру кар'єру та його проєктування до стратегічного й поточного планування із застосуванням сучасного гірничого програмного забезпечення. Здійснено аналіз функціоналу і стадійності робочого процесу проєктування та планування відкритих гірничих робіт у програмному забезпеченні Micromine Beyond. Наукова новизна полягає в детальному аналізі всього циклу відкритих гірничих робіт в одному програмному продукті Micromine Beyond, який представлено у вигляді відповідного алгоритму. Складність геологічної будови родовищ, тривалі терміни відпрацювання й висока капіталомісткість зумовлюють надзвичайну актуальність безперервного процесу оптимізації та стратегічного планування українських гірничодобувних підприємств. Необхідність урахування великої кількості геологічних, гірничотехнічних, технологічних та інших параметрів робить процес оптимізації та планування надзвичайно складним і трудомістким. Сучасне гірничо-геологічне програмне забезпечення дає змогу здійснювати оптимізацію та ефективне планування видобутку, що за поточних економічних умов і технологічних обмежень забезпечує видобувному підприємству максимальний прибуток. Основним результатом дослідження є детальний алгоритм (робочий процес) відкритих гірничих робіт, який включає кілька етапів. (1) Оптимізація контурів кар'єру та стратегічне

планування розвитку складається з визначення параметрів оптимізації, оптимізації блокової моделі, створення граничної оболонки кар'єру, створення набору вкладених оболонок кар'єру, їх аналізу й вибору оптимальної. (2) Проєктування кар'єру включає визначення проєктних параметрів, послідовне проєктування основи кар'єру, його бортів і поверхневої інфраструктури, а також створення соліда кар'єру. (3) Планування гірничих робіт полягає у створенні видобувних блоків, оцінці запасів, створенні стратегічного плану, його оптимізації та переходу до календарного оперативного планування. Кожен етап описано з точки зору вихідних даних, параметрів, математичних та інших методів і результатів.

Ключові слова: оптимізація контуру кар'єру, проєктування кар'єру, оперативне поточне планування, Micromine Beyond Optimiser.

Bariatska Nataliia, Lutsenko Serhii, Hryhoriev Yulian, Plotnikov Oleksandr, Safronova Nina. Design and planning of open-pit mining operations using Micromine Beyond software

The article examines the development of deposits through open-pit mining, covering the optimization of the open-pit outline and its design, as well as strategic and operational planning using modern mining software. A functional analysis and step-by-step workflow of open-pit design and planning in the Micromine Beyond software are conducted. The scientific novelty lies in the detailed analysis of the entire cycle of open-pit mining operations within a single software product, Micromine Beyond, presented in the form of a corresponding algorithm. The complexity of the geological structure of deposits, the long-term nature of exploitation, and the high capital intensity highlight the critical importance of a continuous optimization process and strategic planning for Ukrainian mining enterprises. The need to account for a wide range of geological, mining, technical, technological, and other parameters makes the optimization and planning process highly complex and labor-intensive. The current mining and geological security program allows for optimization and effective planning of the manufacturing industry, which, using precise economical minds and technological boundaries, will ensure maximum profit for the manufacturing industry. The main result of the investigation is a detailed algorithm (working process) of the closed mining robots, which includes a number of stages. (1) Optimization of open-pit contours and strategically planned development consists of a number of optimization parameters, optimization of the block model, creation of the boundary shell of the pit, creation of a set of inserted shells of the pit, Their analysis and selection of the optimal one. (2) Open-pit design includes the determination of design parameters, the subsequent design of the open-pit base, its sides and surface infrastructure, as well as the creation of pit solids. (3) The planning of production operations is based on the creation of production units, inventory assessments based on the strategic plan and its optimization and transition to calendar operational planning. Every stage is described in terms of output data, parameters, mathematical and other methods and results.

Key words: open-pit contour optimization, open-pit design, operational current planning, Micromine Beyond Optimiser.

Вступ. Проєктування та планування гірничих робіт складається зі складних і трудомістких виробничих процесів, особливо в умовах родовищ зі складною геологічною будовою, що давно видобуваються. Необхідно при плануванні оцінювати різні варіанти розвитку гірничих робіт, а також урахувати параметри роботи супутніх гірничо-збагачувальних або гірничо-металургійних комплексів. Стратегічне планування має враховувати зміни економічних показників у часі, оновлення обладнання, зміну кутів бортів кар'єру, якості корисної копалини тощо.

Методи та методики дослідження. Сучасне гірничо-геологічне програмне забезпечення використовується для всього циклу розвитку родовища від геологічної розвідки до гірничого проєктування, планування й управління видобувним процесом. Програмне забезпечення Micromine має комплексні рішення для геологічної розвідки, моделювання, оцінки ресурсів, проєктування відкритих і підземних гірничих виробок, оптимізації гірничих робіт, стратегічного й оперативного планування [1].

Концепція ресурсного моделювання наводиться в роботі [2], геологічне моделювання

й оцінка мінеральних ресурсів за допомогою Micromine й інших програмних продуктів розглядається на прикладах: порфірового родовища міді Боров Дол (Північна Македонія) [3], Сиримбетського рідкіснометалевого родовища [4], залізо-нікелевих руд шахти Скорська [5].

Для залізорудних родовищ сучасні програмні продукти використовують для планування розробки круто падаючих залізорудних покладів [6], буровибухових робіт [7] і вдосконалення поточного планування гірничих процесів для залізорудних родовищ [8].

Аналіз попередніх досліджень показує, що раніше розглядалися проблеми й алгоритми виконання окремих етапів проєктування або планування відкритих гірничих робіт із застосуванням сучасного програмного забезпечення. Завданням статті є розгляд усього процесу від оптимізації контуру кар'єру та його проєктування до стратегічного й поточного планування відкритих гірничих робіт із застосуванням сучасного гірничого програмного забезпечення на прикладі Micromine Beyond.

Результати. Загалом увесь процес проєктування та планування можна подати у вигляді

кількох основних етапів: оптимізації контуру кар'єру та стратегічного планування розвитку рудника, проектування кар'єру на основі обраного оптимального 3D контуру, календарного планування гірничих робіт із різними горизонтами планування.

Оптимізація контурів кар'єру та стратегічне планування розвитку. Однією з найпоширеніших загальних цілей для більшості компаній є збільшення акціонерної вартості в довгостроковій перспективі шляхом максимізації чистої поточної вартості (NPV). Гірничодобувна компанія може мати різні цілі, окрім максимізації прибутку, такі як продовження терміну експлуатації шахти, зниження виробничих витрат, підвищення ефективності виробництва, збільшення вилучення металів тощо.

Алгоритми оптимізації допомагають визначити оптимальний контур гірничих робіт для максимізації прибутку при дотриманні експлуатаційних вимог. Micromine Beyond використовує алгоритм Лерча-Горссмана, створений у 1965 році, який, попри існування низки недоліків, вважається стандартом у галузі проектування кар'єрів. Алгоритм Лерча-Горссмана дає змогу визначити спочатку граничний, а потім й оптимальний контури кар'єру. Граничний контур кар'єру забезпечує дані щодо економічно видобувних запасів родовища. Подальший аналіз вкладених оболонок кар'єру визначає дискontовані фінансові грошові потоки оболонок кар'єру й дає змогу обрати контур кар'єру з максимальною різницею між загальною вартістю корисних компонентів (сировини) родовища та витрат на видобування й переробку. Метод Лерча-Горссмана базується на визначенні вартості кожного блоку, що планується до видобування. Вартість рудних блоків позитивна і складається з вартості видобутої руди за вирахуванням витрат, пов'язаних із переробкою, реалізацією тощо. Блоки пустої породи мають від'ємне значення, яке складається з витрат на видобуток і транспортування. Крім того, використовуються дані про інші блоки, які потрібно попередньо вилучити.

Процес оптимізації контуру кар'єру включає такі ключові кроки: 1) визначення параметрів оптимізації; 2) оптимізація блокової моделі та створення граничної оболонки кар'єру; 3) створення набору вкладених оболонок кар'єру; 4) аналіз вкладених оболонок кар'єру й вибір оптимальної оболонки. Процес оптимізації може бути ітеративним. Після аналізу результатів вхідні параметри можуть бути переглянуті й уточнені, оптимізація може бути повторена [9]. Усі параметри, які використовуються

в процесі оптимізації, можна умовно поділити на такі групи: гірничо-геологічні, проектні, технологічні, економічні.

Результатом оптимізації є набір оболонок кар'єру для різних рівнів прибутку (рис. 1). Звіти результатів оптимізації містять інформацію про термін експлуатації кар'єру, тоннаж і вміст пустої породи й руди, уміст, вилучення, дохід, собівартість, величину прибутку, чистий дискontований дохід тощо. Ці результати також можуть бути представлені у вигляді діаграми (рис. 2).

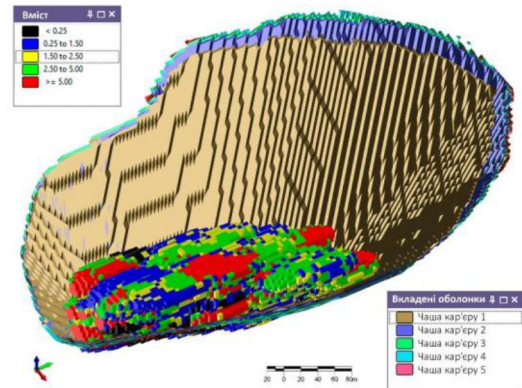


Рис. 1. Приклад вкладених оболонок кар'єру

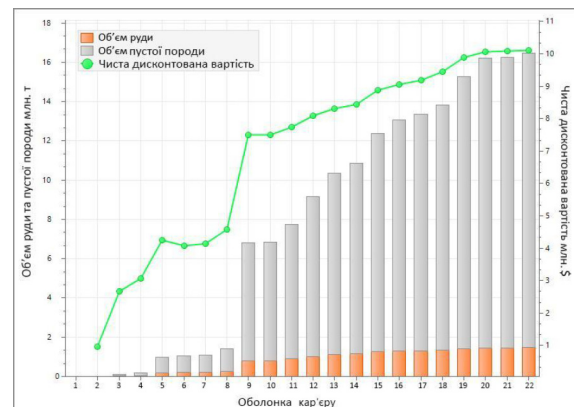


Рис. 2. Діаграма за результатами оптимізації

Для всебічного аналізу результатів оптимізації на діаграмі може бути показаний будь-який із цих параметрів: грошовий потік; поточна вартість; об'єм і тоннаж руди/пустої породи/загальний; коефіцієнт розкриття; уміст; метал; дохід; витрати на видобування. Результати оптимізації дають змогу обрати оптимальну (найбільш економічно доцільну) оболонку кар'єру, а також створити попередній стратегічний план видобутку на весь період існування кар'єру (Life of Mine). Одним із найважливіших параметрів вважається NPV, але також ураховуються обсяги руди, пустої породи й інші показники.

Проектування кар'єру. Основою для проектування є оптимальний 3D контур кар'єру,

створений на попередньому етапі за допомогою оптимізації ресурсів. У деяких випадках може використовуватися ресурсна блокова модель, обмежена економічним бортовим умістом. Процес проєктування в середовищі Micromine Beyond можна поділити на такі основні етапи: визначення проєктних параметрів; проєктування основи кар'єру; проєктування бортів; проєктування поверхневої інфраструктури: відвали, під'їзні дороги; створення соліда кар'єру. Налаштування процесу проєктування потребує визначення таких основних параметрів: напрямок проєктування – уверх або вниз, результуючий кут, висота уступу, кут відкосу уступу, ширина берми, кут нахилу берми, ширина дороги, параметри заїзду на берму. Власне проєктування кар'єру починається з його верхньої або нижньої основи залежно від напрямку проєктування. Проєктування бортів кар'єру можна виконувати в автоматичному або ручному режимі. Перший режим передбачає автоматичну побудову кар'єру за визначеними параметрами до досягнення цільової висотної відмітки або поверхні. Другий режим дає змогу створювати послідовно кожен уступ, змінюючи способи побудови й деякі параметри. Основні інструменти для побудови уступів показано в таблиці 1. Додаткові інструменти

дають можливість також проєктувати розвороти, розрізні траншеї, відвали, рудні склади, під'їзні дороги й інші елементи.

Останнім етапом проєктування є створення замкнутого каркасу (соліду) кар'єру з використанням проєкту кар'єру та поверхні рельєфу (рис. 3). Такий солід може використовуватися для звітності об'єму й тоннажу або створення видобувних блоків.

Планування. Процес гірничого календарного планування має певну ієрархію, може включати кілька стадій із різними періодами деталізації та горизонтами планування.

План видобутку корисних копалин гірничодобувного підприємства повинен урахувати план гірничих робіт і гірничотехнічні показники й забезпечувати таке [8]:

- виконання планових обсягів річного видобутку;
- певну якість корисної копалини для переробки за рахунок розподілення видобутку корисної копалини по ділянках;
- підготовку запланованого об'єму розкритих і підготовлених до видобування запасів корисної копалини.

Micromine Beyond для календарного планування використовує соліди видобувних блоків,

Таблиця 1

Інструменти проєктування уступів на основі визначених параметрів

Позначка	Функція	Параметри	Опис
	Проекція до берми	Ширина берми, висота й кут відкосу уступу	Проекція контуру у вертикальному й горизонтальному напрямках на основі ширини берми, висоти й параметрів відкосу уступу, уверх або вниз, до берми
	Проекція контуру	Висота й кут відкосу уступу	Проекція контуру вверх або вниз на основі висоти уступу, кута відкосу й ширини берми
	Проекція на висоту	Кут відкосу уступу, задана висота	Цей інструмент працює аналогічно проєкції контуру, але із зазначенням фіксованої висоти, на яку буде спроєктовано контур
	Розширення контуру	Ширина берми	Розширення поточного контуру в напрямку всередину або назовні на основі ширини берми

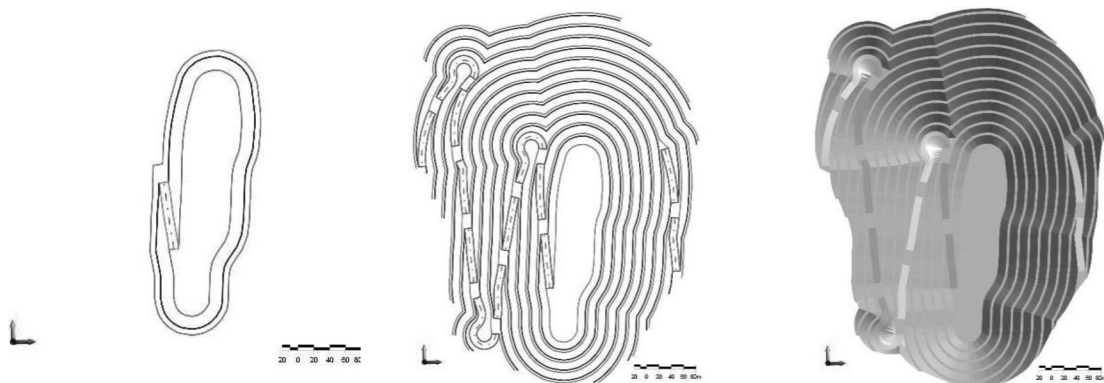


Рис. 3.Процес проєктування в Micromine Beyond

які являють собою задачі з видобування. Такі задачі співвідносяться з блоковою моделлю, імпортується в планувальник Ганта з подальшим визначенням послідовності видобування, створення плану та його оптимізації (рис. 4).

Загалом робочий процес календарного планування можна поділити на такі основні етапи: створення видобувних блоків шляхом розрізання соліду кар'єру на блоки та перетворення їх на видобувні задачі, оцінка запасів, що включає налаштування типів сировини й обрахування параметрів видобувних блоків з використанням блокової моделі, стратегічне планування, яке полягає у визначенні послідовностей і правил видобування, створення стратегічного плану й налаштування діаграми Ганта, оптимізація стратегічного плану з максимізацією цільових показників, оперативне планування, що включає налаштування календарів, розподіл виробничих ресурсів, оновлення видобувних задач. Планувальник Micromine створює плани двох різних типів, стратегічні й оперативні. Стратегічний план надає можливості оптимізації, що

використовується для визначення оптимального графіку видобування.

Методологія полягає у використанні стратегічного плану для складання оптимізованого плану на весь термін експлуатації кар'єру. Надалі це рішення може використовуватися як основа для середньострокового (або короткострокового) плану. Наприклад, рішення, що охоплює перші 5 років оптимізованого стратегічного плану, може бути повторно оптимізовано для створення оптимального середньострокового плану. Після завершення всіх оптимізацій оперативний план може використовуватися для підготовки короткострокового виробничого графіка. Планування видобутку зазвичай охоплює підготовку кількох планів, кожен із яких має вищий рівень деталізації, ніж попередній.

Висновки. Стратегія розвитку багатьох українських гірничодобувних підприємств потребує коригування. Відпрацювання глибоких кар'єрів становить десятки років, упродовж яких змінюються умови видобутку, вартість видобутку руди й розкривних робіт, переглядаються кути бортів

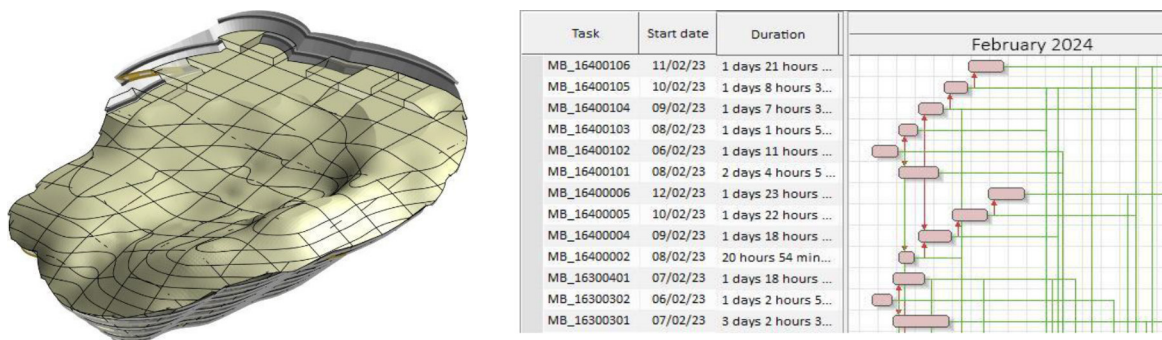


Рис. 4. Видобувні блоки (зліва) і діаграма Ганта (справа)



Рис. 5. Алгоритм процесу проектування та планування відкритих гірничих робіт за допомогою Micromine Beyond

кар'єру, витрати на переробку корисної копалини, ціни на готову продукцію. Тому оптимізація оптимальних параметрів розробки та стратегічне планування мають бути безперервними. Необхідність урахування великої кількості геологічних, гірничотехнічних, технологічних та інших параметрів робить процес планування надзвичайно складним і трудомістким. Сучасне гірничо-геологічне програмне забезпечення дає змогу здійснювати оптимізацію та ефективне планування

видобутку, що за поточних економічних умов і технологічних обмежень забезпечить видобувному підприємству максимальний прибуток.

Процес оптимізації контуру та проектування кар'єру, стратегічного й оперативного планування розглянуто на прикладі Micromine Beyond, який дає змогу виконувати весь цикл операції в одному програмному середовищі. Робочий процес можна представити у вигляді алгоритму (рис. 5).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Bariatska N. Micromine Tools for Geological and Economic Assessment of Mineral Projects. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. Nov 2022. P. 1–5.
2. Баряцька Н.В., Сафронова Н.Г. Підрахунок запасів рудних родовищ методами блокового моделювання як сучасна альтернатива традиційним методам. *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування* : матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. 2019. Т. I. С. 181–185.
3. Peltekovski Z., Serafimovski D., Tasev G., Serafimovski T. MICROMINE calculations of ore reserves in the Borov Dol porphyry copper deposit, Republic of North Macedonia. *Geologica Macedonica*. 2023. № 37(1). P. 49–63. DOI: 10.46763/GEOL23371049p
4. Issayeva L., Togizov K. S., Duczmal-Czernikiewicz A. Ore-controlling factors as the basis for singling out the prospective areas within the Syrymbet rare-metal deposit, Northern. *Mining of Mineral Deposits*. 2022. № 16 (2). P. 14–21.
5. Shehu A., Lipo S. 3D modeling and interpretation of fe/ni deposit in Skroska mine using Micromine. *Journal of natural and technical sciences*. 2016. № XXI (1). P. 49–62.
6. Panchenko V., Sobko B., Lotous V., Vinivitin D., Shabatura V. Openwork scheduling for steep-grade iron-ore deposits with the help of near-vertical layers. *Mining of Mineral Deposits*. 2021. № 15 (1). P. 87–95. doi: 10.33271/mining15.01.087
7. Анісімов О., Черняєв О., Гуров І. Порівняння схем буріння і заряджання підривних свердловин з використанням сучасного програмного продукту Micromine. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна»* : всеукраїнський науковий збірник. 2023. № 2 (30). С. 29–38.
8. Анісімов О.О. Баряцька Н.В. Вдосконалення поточного планування процесів гірничих робіт в умовах залізрудних кар'єрів України. *Залізрудні родовища України: сучасні проблеми та перспективи розробки*. 2024. С. 45–48.
9. Micromine setting the standard in Pit Optimisation. 2017. URL: <https://www.micromine.com/micromine-setting-standard-pit-optimisation/>

REFERENCES:

1. Bariatska, N. (2022). Pidрахunok zasiv rudnykh rodovyshch metodamy blokovooho modeliuvannia yak suchasna alternatyva tradytsiinym metodam [Micromine Tools for Geological and Economic Assessment of Mineral Projects]. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5.
2. Bariatska, N. V., & Safronova, N. H. (2019). Estimation of Ore Deposit Reserves Using Block Modeling Methods as a Modern Alternative to Traditional Methods. *VI International Scientific and Practical Conference «Subsoil Use in Ukraine. Investment Prospects»*. Vol. I. pp. 181–185.
3. Peltekovski, Z., alibor Serafimovski, D., Tasev, G., & Serafimovski, T. (2023). MICROMINE calculations of ore reserves in the Borov Dol porphyry copper deposit, Republic of North Macedonia *Geologica Macedonica*. 37(1). P. 49–63. DOI: 10.46763/GEOL23371049p
4. Issayeva, L., Togizov, K. S., & Duczmal-Czernikiewicz, A. (2022). Ore-controlling factors as the basis for singling out the prospective areas within the Syrymbet rare-metal deposit, Northern. *Mining of Mineral Deposits*. 16(2). P. 14–21.
5. Shehu, A., & Lipo, S. (2016). 3D modeling and interpretation of fe/ni deposit in Skroska mine using Micromine. *Journal of natural and technical sciences*. XXI(1). P. 49–62.

6. Panchenko, V., Sobko, B., Lotous, V., Vinivitin, D., & Shabatura, V. (2021). Openwork scheduling for steep-grade iron-ore deposits with the help of near-vertical layers. *Mining of Mineral Deposits*. 15 (1). P. 87–95. doi: 10.33271/mining15.01.087
7. Anisimov, O., Cherniayev, O., & Hurov, I. (2023). Porivniannia skhem burinnia i zariadzhannia pidryvnykh sverdlovin z vykorystanniam suchasnoho prohramnoho produktu Micromine [Comparison of Drilling and Blasting Schemes Using the Modern Software Product Micromine]. *All-Ukrainian Scientific Collection Research papers of DonNTU. Mining and Geological Series*. No. 2(30). pp. 29–38.
8. Anisimov, O. O., & Bariatska, N. V. (2024). Vdoskonalennia potочноho planuvannia protsesiv hirnychykh robit v umovakh zalizorudnykh karieriv Ukrainy [Improvement of Current Planning for Mining Processes in the Conditions of Ukraine's Iron Ore Open-Pits]. *Iron Ore Deposits of Ukraine: Current Issues and Prospects for Development*. pp. 45–48.
9. Micromine setting the standard in Pit Optimisation. (2017). Retrieved from: <https://www.micromine.com/micromine-setting-standard-pit-optimisation>