УДК 553.048:004.942

# ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ІНСТРУМЕНТІВ MICROMINE В ПРОЦЕСІ ГЕОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОЇ ОЦІНКИ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

***Сафронова Н.Г.,*** *1sanige80@gmail.com;*
***Баряцька Н.В.,*** *д. геол. н., BariatskaN@gmail.com;*
*ТОВ «Софтмайн», м. Київ, Україна*

У контексті інтенсивної цифровізації геологічної та гірничодобувної галузей у всьому світі, застосування інноваційних технологій забезпечує прийняття більш обґрунтованих оперативних і стратегічних рішень. Застосування сучасних інструментів для збору та аналізу геологічних даних, проєктування та реалізації геологорозвідувальних робіт, дослідження геологічної будови, підрахунку запасів та техніко-економічного обґрунтування розглядається на прикладі програмного забезпечення Micromine. Застосування інноваційних інструментів та технологій на всіх етапах геолого-економічної оцінки мінімізують ручні операції, скорочують кількість помилок і значно прискорюють роботи.

# INNOVATIVE MICROMINE TOOLS FOR GEOLOGICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF MINERAL DEPOSITS

***Safronova N.****, 1sanige80@gmail.com;*
***Bariatska N.****, Dr. Sci. (Geol.), BariatskaN@gmail.com;*
*Softmine LLC, Kyiv, Ukraine*

Innovative technologies ensure more informed operational and strategic decision-making in the context of intensive digitalisation of the geological and mining industries worldwide. The modern tools to collect and analyse geological data, design and carry out geological exploration, geological research, reserve estimation, and feasibility studies are discussed through the Micromine software. The innovative tools and technologies used at all stages of geological and economic assessment minimise manual operations, reduce errors, and significantly speed up work.

Геолого-економічна оцінка (ГЕО) об’єктів надрокористування – це періодичний аналіз геологічного та техніко-економічного вивчення скупчень корисних копалин для оцінки (переоцінки) їхнього промислового значення [3]. Процес геолого-економічної оцінки можна умовно поділити на такі етапи:

– збір та аналіз даних попередніх етапів геологічного вивчення,
– геологорозвідувальні роботи,
– вивчення геологічної будови,
– підрахунок запасів,
– техніко-економічне обґрунтування.

Застосування інноваційних інструментів та технологій на всіх етапах геолого-економічної оцінки мінімізують ручні операції, скорочують кількість помилок і значно прискорюють роботи. Такі інструменти розглядаються тут на прикладі гірничо-геологічного програмного забезпечення Micromine і кожен з них умовно відноситься до певного етапу геолого-економічної оцінки, але деякі можуть використовуватися в процесі кількох різних етапів.

**Збір та аналіз даних попередніх етапів геологічного вивчення** передбачає використання інструментів для імпорту різних геологічних даних та суміщення у межах одного проєкту, включаючи перетворення систем координат, створення та перевірку баз геологічних даних та ін. Нижче розглянуто деякі з ключових інструментів.

Імпорт та суміщення різних типів даних реалізується завдяки вбудованому набору інструментів для імпорту, візуалізації та аналізу даних з різних джерел з підтримкою понад 70 форматів, у тому числі табличних (CSV, Excel, та SQL), векторних (CAD, ГІС), растрових та ін. Зокрема реалізована візуалізація і аналіз даних SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), LIDAR (Light Detection and Ranging), Google Earth та інших джерел.

Конвертація між різними системами координат, включаючи стандартні, локальні та прямокутні мережі, допомагає геологам використовувати в одному проєкті дані з координатами різних систем. Наприклад, дані історичної розвідки часто представлені у

локальній системі координат, регіональні історичні дані – у СК-42, топографічна зйомка поверхні – у УСК-2000, зовнішні глобальні дані (космічні знімки та ін.) – у UTM (WGS 84). Можливість конвертації реалізована для файлів даних, каркасів, зображень, векторних даних та інших форматів [4].

Створення та перевірка баз даних свердловин та борозневого опробування (для шурфів, траншей або підземних гірничих виробок). Інструменти роботи з базами даних дозволяють імпортувати або створювати окремі таблиці даних, поєднуючи їх за ключовими полями, а також імпортувати або підключати зовнішні бази даних. Інструменти автоматичної перевірки виявляють критичні помилки, такі як відсутність основної інформації про розташування свердловини (координат, глибини, азимуту ба кута буріння), інтервалів опробування або геологічної документації з перекриттям або нижче загальної глибини свердловини і т.ін. У таблиці помилок, яка може бути збережена у вигляді звіту, відображаються усі виявлені помилки. Вона пов'язана з таблицями даних, а усі виправлення можуть відбуватися інтерактивно для полегшення і прискорення цього процесу (Рис. 1).

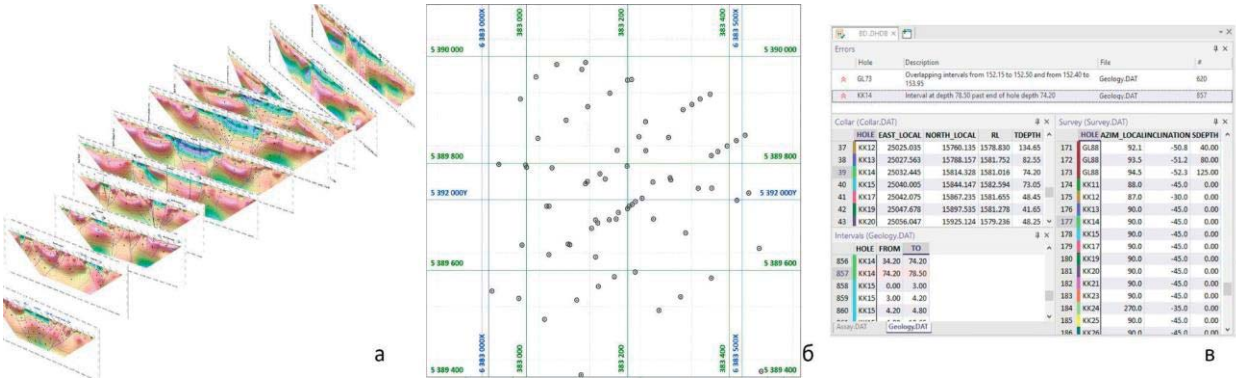


**Рис. 1. Координатна прив'язка растрових зображень (а), конвертація систем координат (б) і перевірка БД (в)**

**Геологорозвідувальні роботи** являють собою комплексні дослідження, спрямовані на геологічне вивчення надр і передбачають використання інструментів для проєктування розвідувальних свердловин, збору польових геологічних даних, обробки та контролю якості результатів лабораторних досліджень (Рис. 2).

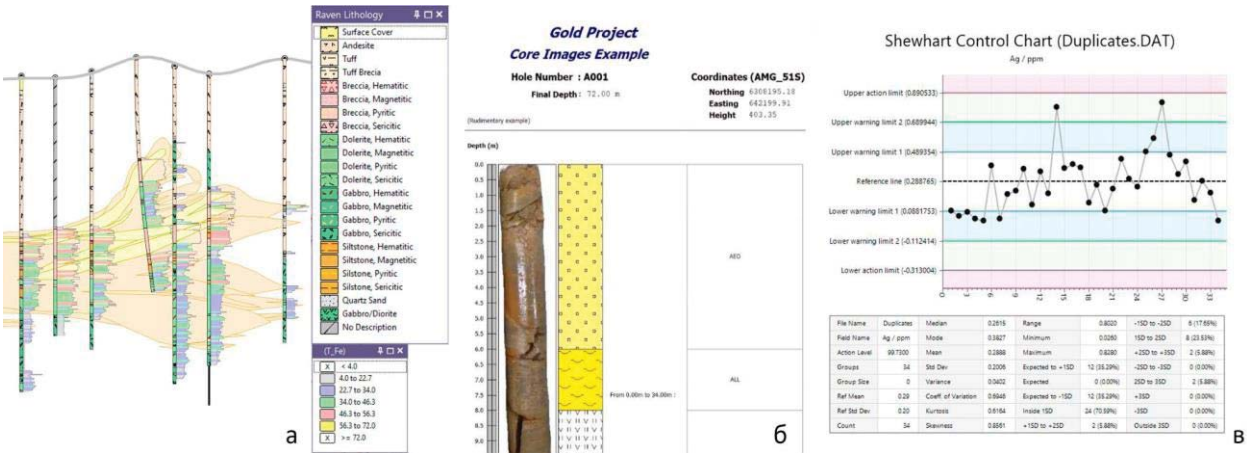


**Рис. 2. Візуалізація геологорозвідувальних даних (а), колонка свердловини (б), діаграма Шухарта (в)**

Інструменти проєктування свердловин дозволяють створювати мережі, віяла або поодинокі свердловини в автоматичному режимі, враховуючи параметри мережі, орієнтацію та поверхню рельєфу; створювати або коригувати проєктні свердловини інтерактивно в ручному або напівавтоматичному режимі. Результати проєктування можуть бути збережені у вигляді бази даних і надалі поповнюватися інформацією геологічної документації, опробування і т. ін.

Використання тривимірних моделей, створених на основі даних попередніх (історичних) етапів геологічних досліджень із застосуванням сучасних інструментів проєктування свердловин дозволяють створити найбільш оптимальну бурову програму для ефективного виконання задач геологічної розвідки.

Збір польових даних включає геологічну документацію, опробування із занесенням інформації до цифрової бази даних з використанням словників та автоматичної перевірки технічних помилок. Імпорт безпосередньо з периферійних пристроїв та реєстраторів (ваги, радіометри, польові спектрометри, фотокамери, GPS та ін.) дозволяє автоматично поповнювати бази даних в режимі реального часу. Трекер лабораторних проб забезпечує функції управління, перевірки та аналізу аналітичних даних.

Контроль якості лабораторних досліджень (QA/QC) включає діаграми розсіювання для порівняння результатів польових та аналітичних дублікатів, діаграми Шухарта [12] з правилами Нельсона для аналізу результатів стандартних та холостих проб, а також імпорт лабораторних сертифікатів з інтеграцією до бази даних та ін. Усі ці інструменти дозволяють перевірити коректність даних та систематичні похибки у процесі опробування, пробопідготовки та аналітичних досліджень [2].

**Вивчення геологічної будови**. Для відтворення геологічної будови родовища використовуються інструменти каркасного, умовного або стратиграфічного моделювання .

Каркасне моделювання зазвичай полягає у інтерпретації геологічних даних (гірських порід, композитних рудних інтервалів) у розрізах шляхом створення контурних поліліній, які у подальшому поєднуються у каркаси (геологічні, рудні тіла) та поверхні (контакти, розломи) у автоматичному або напівавтоматичному режимі (Рис. 3 а). Інструменти редагування і перетворення каркасів застосовуються для операцій перетину, обрізання, розділення, копіювання, переміщення у інтерактивному режимі.

Умовне моделювання (implicit modelling – неявне моделювання) – це швидке автоматичне створення поверхонь та замкнених солідів, які являють собою літологічні контакти, розломи та вмісти, безпосередньо з геологічних даних (свердловин, поліліній, точок) з використанням радіальних базисних функцій на основі заданих параметрів (Рис. 3 б). Інструменти умовного моделювання дозволяють створювати комплексні геологічні моделі об’єктів без перекриттів і необхідності ручного коригування, що зменшує кількість ручних операцій і економить час.

Стратиграфічне моделювання застосовується для будь-яких пластових родовищ , таких як вугілля, латерити, фосфати, боксити, залізні руди, і полягає у створенні складних стратиграфічних ієрархій, кореляції пластів між свердловинами, моделювання поверхонь пластів на основі сіток, генерації пластових блокових моделей (Рис. 3 в).

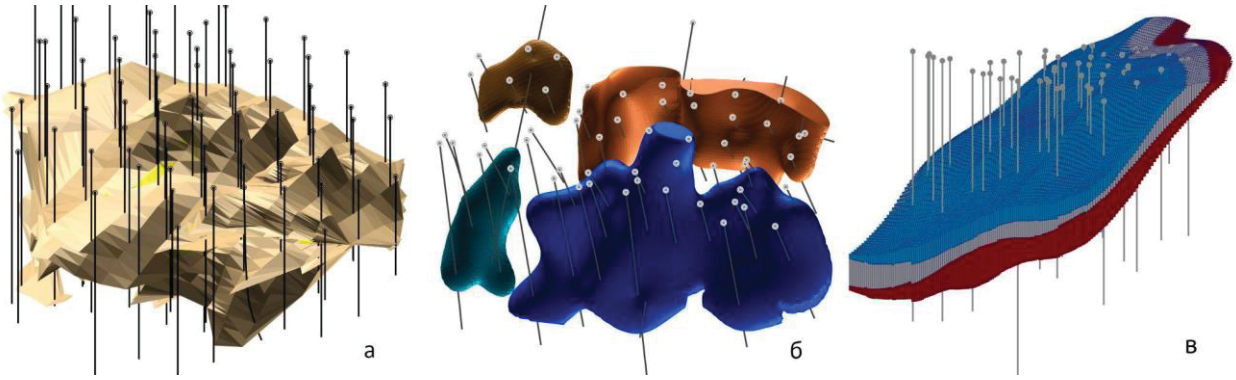


**Рис. 3. Каркасна (а), умовна (б) і стратиграфічна (в) моделі**

Тривимірні геологічні моделі дозволяють краще уявляти геологічну будову родовища, яка є основою подальшого підрахунку запасів.

**Підрахунок запасів методами блокового моделювання** передбачає використання статистичних та геостатистичних інструментів (Рис. 4), блокового моделювання, інтерполяції, створення звітності щодо запасів та перевірку коректності результатів

моделювання, а також полігональної оцінки.

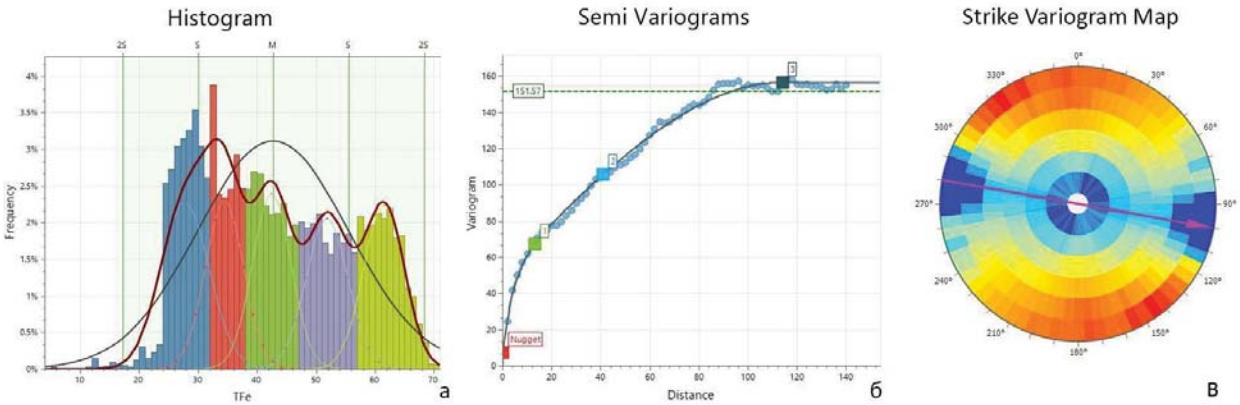


**Рис. 4. Гістограма (а), варіограма (б), карта варіограми (в)**

Статистичні інструменти, застосовуються для аналізу та інтерпретації розподілу геологічних параметрів та змінних, підтвердження їхньої однорідності та безперервності, а за необхідності – поділу на популяції (домени). Статистичні інструменти включають різноманітні діаграми, статистичні перетворення та зведення (включаючи квартилі, перцентилі та ін.) [5].

Геостатистичні інструменти дозволяють аналізувати просторову кореляцію - зв'язок між відстанню і значенням вмісту або іншого параметру, а також допомагають підбирати оптимальні параметри області (еліпсу) інтерполяції на основі аналізу варіограм (вздовж свердловин, всеспрямованих, карт варіограм тощо).

Блокове моделювання забезпечує створення та обробку блокових моделей, включаючи функції переблокування, повороту, об'єднання та оптимізації, що підвищують точність моделювання і відповідність геологічним структурам. Використання структурних трендів та динамічного пошуку забезпечує краще відображення геологічних особливостей.

Інструменти інтерполяцій значень у блокову модель використовують різні методи, а саме зворотних зважених відстаней та різні модифікації кригінгу, таких як простий ординарний, поліиндикаторний та ранговий [10]. За допомогою цих інструментів вміст корисного компоненту, об'ємна вага та інші величини інтерполюються з використанням параметрів області пошуку (еліпсу інтерполяції), таких як радіус, співвідношення та орієнтація осей, і записуються у блоки моделі.

Функції перевірки ресурсних моделей дозволяють перевіряти коректність блокових ресурсних моделей та відповідність вихідним даним (пробам або композитам). Для цього зазвичай використовуються порівняльні гістограми, статистичні звіти, графіки Swath, перехресна перевірка, QKNA (Quantitative Kriging Neighborhood Analysis - кількісний аналіз області пошуку кригінгу) та ін. [1].

Звіти щодо запасів корисних копалин являють собою результуючі таблиці, створені на основі узагальнення блокових моделей, і містять дані про запаси, класифіковані за різними параметрами, такими як бортові вмісти, типи руди, ділянки родовища і т. ін. Отримані результати підрахунку запасів можуть використовуватись для звітів щодо геолого-економічної оцінки родовища або інших офіційних документів.

Полігональна оцінка полягає у створенні полігонів, які являють собою контури рудних тіл, за розвідувальними профілями, із розпрямленням на площини розрізів, обчислення об'ємів блоків між двома сусідніми полігонами та середньозважених вмістів корисних компонентів. За результатами створюється звіт щодо запасів руди та металу, а також середньозваженого вмісту. Така методика дуже подібна до традиційного підрахунку запасів методом розрізів.

**Техніко-економічне обґрунтування** – розрахунок економічної доцільності виробничої діяльності гірничо-добувного підприємства (ГЕО-1), промислового освоєння (ГЕО-2) або геологорозвідувальних робіт (ГЕО-3) може використовувати інноваційні

інструменти для оптимізації запасів, проєктування та планування гірничих робіт.

Оптимізація запасів здійснюється через визначення “вартості” кожного блоку, яка обчислюється як дохід від продажу товарних продуктів за вирахуванням усіх витрат. Алгоритми оптимізації допомагають визначити оптимальний контур гірничих робіт (Рис. 4 а) для максимізації прибутку при дотриманні експлуатаційних вимог [11]. Цей процес базується на блоковій ресурсній моделі з урахуванням обмежуючих гірничо-технічних, технологічних, економічних та інших параметрів (модифікуючих факторів). Застосування таких параметрів дозволяє перейти від ресурсів (запасів у надрах) до видобувних (балансових) запасів [8].

На більш детальних стадіях геолого-економічної оцінки передбачається застосування більш високий категорій запасів, а також більш детально обґрунтованих параметрів оптимізації).

Інструменти проєктування дозволяють створювати чаші кар’єрів, кар’єрні дороги, розвороти, розрізні траншеї, штреки, шахтні стволи, похилі з’їзди, відвали, рудні склади, під’їзні дороги та ін. елементи. Інструменти дозволяють швидко створювати попередні проєкти за заданими параметрами в автоматичному режимі або більш детальні - зі змінними параметрами в ручному або напівавтоматичному режимі. Проєкти можуть бути представлені у вигляді каркасів або солідів (Рис. 4 б), що дозволяє виокремити частину запасів блокової моделі у межах спроєктованих гірничих виробок.

Стратегічне планування передбачає створення каркасів видобувних блоків (Рис. 4 в), налаштування типів сировини, обрахування запасів у межах блоків шляхом співставлення з блоковою моделлю, визначення послідовності видобутку з використанням планувальника Ґанта. Ці інструменти дозволяють точно визначати кількість запасів та стратегічний план їх видобутку (Life of Mine Plan), що є актуальним для детального техніко-економічного обґрунтування [7 та ін.].

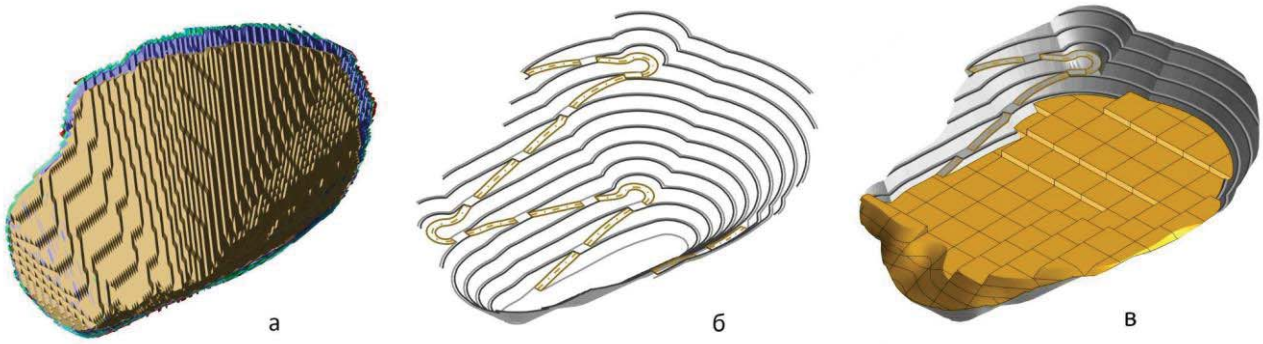


**Рис. 5. Вкладені оптимізовані оболонки кар’єру (а), проєкт кар’єру (б), видобувні блоки (в)**

Застосування оптимізації виглядає більш доцільним на початкових етапах геолого-економічної оцінки родовища, тоді як на детальних стадіях доречними є більш точні інструменти проєктування та планування.

Інші додаткові інструменти, такі як створення макросів або скриптів надають широкі можливості щодо автоматизації рутинних робочих процесів, що дозволяє суттєво скорочувати кількість помилок і уникати великих обсягів ручної роботи. Функції оформлення графічних матеріалів дозволяють створювати карти, розрізи, діаграми для оформлення звітів. Спільна робота над проєктами з різними правами доступу для різних спеціалістів у єдиному хмарному середовищі або корпоративній мережі гарантує безпечний і швидкий обмін актуальними даними. Крім того, потужний функціонал планування та супроводження гірничих робіт дозволяє враховувати велику кількість параметрів, розглядати різні варіанти розвитку гірничих робіт, оптимізувати робочі процеси, підвищити швидкість та ефективність планування і прийняття оперативних рішень.

У контексті інтенсивного розвитку інформаційних технологій та штучного інтелекту у всьому світі спостерігається стійкі тенденції до цифровізації усіх галузей промисловості

та бізнесу [6; 9]. Враховуючи складність та багатофакторність геологічної та гірничодобувної галузей застосування інноваційних технологій є вкрай ефективним і забезпечують прийняття більш обґрунтованих оперативних і стратегічних рішень.

**Список використаних джерел:**


1. Баряцкая Н.В., Сафронова Н.Г. Поэтапная заверка при трёхмерном моделировании и оценке ресурсов рудных месторождений. Геоинформатика. № 1 (69), 2019, С. 47–57.
2. Баряцька Н., Сергеєва С. Використання контрольних проб для забезпечення і контролю якості (QA/QC). Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2023 2(101), С. 75–80. DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.11
3. Лисенко О.А. Геолого-економічна оцінка корисних копалин (актуальні питання й методичні аспекти). Мінеральні ресурси України, 2017 (№3), с. 22–26 ORCID-0000-0002-4847-9116.
4. Перетворення систем координат у Micromine Origin&Beyond, 2024 https://softmine.com.ua/peretvorennia-system-koordynat-u-micromine-origin-beyond/
5. Статистичні діаграми в Micromine. Визначення та функціональні можливості, 2024 https://softmine.com.ua/statystychni-diahramy-v-micromine/
6. Alonso, T. Digital Transformation in Mining: Why it's a Necessity, 2022 https://www.cascade.app/blog/digital-transformation-mining#:~:text=Digital%20transformation%20in%20mining%20is,the%20status%20quo%20and%20differentiate
7. Anisimov O., Bariatska N. and Cherniaiev O. Strategic planning of open pit mining operations using the Micromine Beyond Optimiser. V International Conference "ESSAYS OF MINING SCIENCE AND PRACTICE", 2024, DOI:10.1088/1755-1315/1348/1/012005.
8. Bariatska N. Reserve Estimation during (Pre)Feasibility Study of Mineral Projects using Micromine Pit and Stope Optimizers. XVII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment", Kyiv, Ukraine, 2023.
9. Bariatska N., Tarasov V. Innovative Technologies to Make Effective Business Decisions at Every Stage of a Mining Company's Development. Data-Centric Business and Applications, 2024, c. 315–335 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-53984-8_14
10. Coombes, J. I'd like to be OK with MIK, UC?: A Critique of Mineral Resource Estimation techniques, 2016, www.coombescapability.com.au
11. Micromine setting the standard in Pit Optimisation, 2017 https://www.micromine.com/micromine-setting-standard-pit-optimisation/
12. Shewhart, W.A. Statistical method from the viewpoint of quality control, 1939.