

УДК 553.4

DOI <https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2024.4.16>

**Олександр Прокопенко**

магістр,

ТОВ «Геологічна сервісна компанія ГСК»

[alex.prokop2206@gmail.com](mailto:alex.prokop2206@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6817-1696>

**Наталія Баряцька**

доктор геологічних наук,

старший науковий співробітник,

ТОВ «Софтмайн»

[BariatskaN@gmail.com](mailto:BariatskaN@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8068-2464>

**Віталій Зацерковний**

доктор технічних наук, професор,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

[vitalii.zatserkovnyi@gmail.com](mailto:vitalii.zatserkovnyi@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>

**ПОРІВНЯННЯ АЛГОРИТМІВ КАРКАСНОГО ТА УМОВНОГО ГЕОЛОГІЧНОГО  
МОДЕЛЮВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ MICROMINE**

**Анотація.** Стаття присвячена дослідженню ефективності каркасного та умовного моделювання у програмному продукті Micromine. Здійснення детального аналізу обох методів дає змогу оцінити їхню точність та придатність для практичного використання у геологорозвідувальних роботах та при подальшому освоєнні родовища. В статті розглядаються методологія застосування кожного з підходів, а також їхні переваги та недоліки. Результати дослідження можуть бути корисними для фахівців у галузі геології та гірничопромислового виробництва, які використовують програмний продукт Micromine для геологічного моделювання та оцінки запасів корисних копалин. Розглянуто різні аспекти використання цих методів, включаючи швидкість створення моделей, їхню точність та зручність у підтримці та оновленні. Загальна увага приділяється розумінню та порівнянню результатів, що виробляються кожним із методів, з метою надання вичерпної оцінки їхньої ефективності та придатності для практичного використання в галузі.

**Ключові слова:** каркасне моделювання, умовне моделювання, оцінка запасів, корисні копалини, порівняльний аналіз.

**Prokopenko Oleksandr, Baryatska Natalia, Zatserkovnyi Vitalii. COMPARISON OF WIREFRAME  
AND IMPLICIT GEOLOGICAL MODELING ALGORITHMS IN MICROMINE**

**Abstract.** The article aims to compare the main algorithms and results of explicit and implicit modeling in the Micromine software. Conducting a quantitative analysis of both methods' outcomes will determine their accuracy and suitability for practical use in geological exploration and further deposit development. The article discusses the methodology of applying each approach and provides a comparative analysis to identify the advantages and disadvantages of each method. The research findings can be valuable for geologists and mining enterprises using Micromine for geological modeling and mineral reserve estimation. Additionally, it examines the potential for integrating both methods and suggests further avenues for research to enhance modeling accuracy and efficiency.

**Key words:** wireframe modeling, implicit modeling, reserve estimation, mineral resources, comparative analysis.

**Актуальність теми дослідження.** Актуальність теми полягає в необхідності переходу на сучасні інструменти та постійного вдосконалення існуючих методів геологічного та ресурсного моделювання для вивчення та відпрацювання родовищ. Зростання конкуренції, зміни в ринкових умовах та постійна необхідність оптимізації виробничих процесів ставлять підви-

щені вимоги до точності та ефективності таких оцінок. Програмне забезпечення Micromine, дає змогу оцінити ефективність і достовірність сучасних методів підрахунку запасів за допомогою широкого набору інструментів призначених для різних методів моделювання. В контексті програмного продукту Micromine, який широко використовується в геологорозвідувальній та видобувній галузі, розгляд цієї теми стає актуальним і важливим для практикуючих геологів та фахівців у гірничій сфері.

**Стан вивчення питання.** Багато наукових праць і досліджень було покладено в розробку сучасних інструментів, в основі яких лежить моделювання. Підчас розвідки та розробки родовищ корисних копалин, також широко використовуються різні типи моделей. Сучасні програмні продукти, такі як: Micromine, Datamine, Leapfrog Geo, Geoteric, GOCAD, Petrel, Gemcom Surpac, Maptek Vulcan мають інтегровані інструменти для ручного, геостатистичного та умовного моделювання. В основу цих інструментів лягли наукові дослідження першопрохідців: George M. Matheron, André G. Journel, Michel David, L. B. Gustafson, M. Armstrong та P. A. Dowd Ці вчені відіграли ключову роль у вдосконаленні методів оцінки родовищ корисних копалин, що допомагає підвищити точність прогнозів та приймати більш обґрунтовані рішення в галузі гірничої промисловості.

Теоретичні основи алгоритмів умовного моделювання, а саме Радіальних базисних функцій(РБФ) та Крокуючих кубів, наведено у наукових працях Benyu Li, Deyun Zhong, Liguang Wang [4], J. Guo, L. Wu, W. Zhou [5].

**Метою дослідження** є провести порівняльний аналіз двох методів геологічного моделювання: каркасного моделювання (ручного) та умовного моделювання (автоматичного) та проаналізувати можливі відмінності викликані різницею принципів покладених в їх роботу.

**Методи та матеріали дослідження.** Основним методом дослідження є порівняльний аналіз алгоритмів та результатів каркасного та умовного моделювання.

У першому випадку геометрія рудного тіла визначається на основі особистої оцінки та впливу геологічних знань і досвіду інтерпретатора, але основна проблема полягає у тому, що може існувати багато варіантів інтерпретації, що робить метод суб'єктивним.

У другому випадку використовуються радіальні базисні функції для інтерполяції, де модель будується на основі тривимірної функції, що представляє літологічний розподіл.

Обидва методи були протестовані на даних буріння золоторудного родовища. Для моделювання мінералізації, пов'язаної з золоторудними тілами, використовувалося програмне забезпечення Micromine Origin.

**Виклад основного матеріалу.** Геологічне моделювання – це процес, який використовується для реконструкції родовища корисних копалин і створює тривимірну віртуальну модель, що відображає як морфологію, так і властивості. Тривимірне моделювання надає загальне уявлення про родовище корисних копалин, а також визначає розмір, геометричну форму, елементи залягання та просторовий розподіл мінералізації.

Розвиток гірничого підприємства дуже тривалий процес, який займає від років до десятиліть. За цей період підприємство проходить кілька етапів від картування території до видобутку та виробництва. Одним із найскладніших етапів є геолого-економічна оцінка, для цього проводять величезну кількість досліджень різного роду, щоб визначити чи є доцільним освоєння цього родовища [3]. Загалом ці дослідження проводяться різнопрофільними командами, які використовують геологічну модель для розробки технічних, економічних та екологічних проєктів. Ця модель також є основою для планування видобувних робіт, тому важливо, щоб вона була максимально точною та достовірною.

Геологічне моделювання є одним з обов'язкових та важливих етапів геолого-економічної оцінки родовищ корисних копалин [1]. Але геологічна модель будується на основі обмежених даних вибірки, отриманих з керну свердловин. Такий підхід отримання даних є дороговартісним, тому геологорозвідувальна мережа свердловин планується з розрахунку співвідношення

вартості до кількості отриманої корисної інформації під час геологорозвідувальних робіт. Отже, загальний обсяг вибірки зазвичай дуже малий порівняно з розміром родовища, лише достатній для забезпечення представництва змінних, що досліджуються.

Це обумовлює необхідність інтерполяції не вибірових даних для побудови геологічних моделей. Існують різні методи інтерполяції; вони можуть бути класичними або обчислювальними. Класичні методи інтерполяції базуються на аналітичних формулах та математичних принципах, тоді як обчислювальні методи використовують чисельні алгоритми та обчислювальні методи для оцінки та апроксимації даних [9]. Нарешті, якість цієї моделі буде залежати від точності даних та вибору відповідного методу оцінки для кожного типу родовища.

На сьогодні існують технологічні інструменти, які можуть проводити моделювання «автоматично», проте вони не дають змоги врахувати знання та досвід фахівця.

### ***Методика ручного каркасного моделювання***

Каркасне моделювання також відоме, як метод паралельних розрізів. Геометрія мінералізованої зони показана на серії вертикальних або горизонтальних розрізів, які системно перетинають рудне тіло. Вертикальні розрізи зазвичай збігаються з геологорозвідувальними профілями. Горизонтальні розрізи створюються на певних абсолютних відмітках, що базуються на основі інтерпольованої інформації по вертикальних розрізах.

Ці розрізи зазвичай інтерпретуються вручну, за допомогою програмного забезпечення для моделювання або навіть дошки для малювання, враховуючи акумульовану інформацію про геологічні особливості, геоморфологію, літологію, структуру, мінералізацію та порівнюючи з генетично схожими родовищами. Почергове просторове об'єднання цих секцій призведе до створення тривимірної моделі рудного тіла [8].

За словами Маклена та Дойча [6], метод паралельних секцій є явним методом геологічного моделювання. Хоча метод досить зрозумілий, є певні обмеження: значні часові затрати, суб'єктивність замість повторюваності, негнучкість та неможливістю доступу до межі невизначеності.

*Простота.* Не дивлячись на те, що процес є досить енергозатратним, сам процес створення полігонів із набору розрізів є доволі простим. Фактично, це є головною причиною популярності цього методу.

*Тривалість.* Створення контурних ліній у 2D займає величезну кількість часу. Дуже часто фахівцю доводиться витратити до трьох місяців на розробку геологічної моделі.

*Суб'єктивність і неповторюваність.* Об'єм рудних порід складається з набору постійно повторюючихся малих суб'єктивностей та детермінованих рішень. Наприклад, кут контурної лінії в кожному розрізі, який фахівець обирає самостійно. Безумовно, прослідковується й власний стиль у процесі оконтурення. Наприклад, геологи, геофізики та інженери будуючи моделі, отримують моделі, які значно відрізнятимуться при однакових вхідних даних.

*Негнучкість.* Дуже складно оновити геологічну модель, якщо з'являться нові свердловини або додаткова інформація. Зазвичай, оновлення геологічної моделі робиться окремими етапами, коли накопичується певний об'єм нової геологічної інформації.

*Недосяжна неоднозначність.* Складно оцінити загальну невизначеність у геометричних межах між точками опробування. Ця невизначеність може бути головним джерелом ненадійності в багатьох ситуаціях. Наприклад, у родовищах золота об'єм рудної маси є критично важливим економічним індикатором для управління проектом. Ігноруючи об'ємну невизначеність, враховуючи лише експліцитні (явні) границі рудного тіла можна розорити (знищити) перспективне підприємство.

*Геологічна відповідність.* Незважаючи на всі ці обмеження ручного методу, отримані межі будуть геологічно реалістичними. Це означає що процес точкової перевірки даних новим бурінням у вже змодельованій ділянці дасть очікуваний результат, що буде відповідати певним геологічним критеріям. Це також дає змогу планувати додаткові комплекси робіт під необхідний результат.

Також немає простого підходу в об'єднанні одного контуру з декількома контурами у двох суміжних (межуючих) розрізах через невизначеність. Це фактично є найбільш важливим обмеженням методу.

Територія на якій розташоване родовище розвідане геологічними профілями, які розташовані в поперек простягання рудного покладу з заходу на схід. Загальна кількість розвідувальних профілів 26, відстань між профілями складає від 15 м в центральній частині до 60 м по краям. Дані по свердловинам, а саме їх координати, інклінометрія, літологія та рядове опробування, було представлено у кожному з профілів.

Перед оконтурення рудних контурів, як правило створюють композити, які базуються на параметрах кондицій. Для оконтурення було створено метрові композити.

В результаті інтерпретації було створено контури рудного тіла у кожному геологорозвідувальному профілі, загальна кількість контурів 26 (рис. 1, рис. 2).

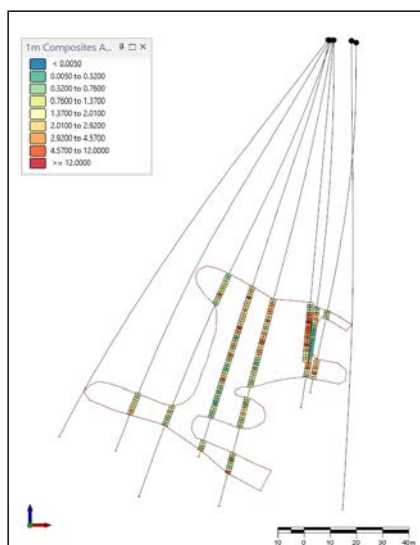


Рис. 1. Свердловини 16 профілю з метровими композитами та контур рудного тіла

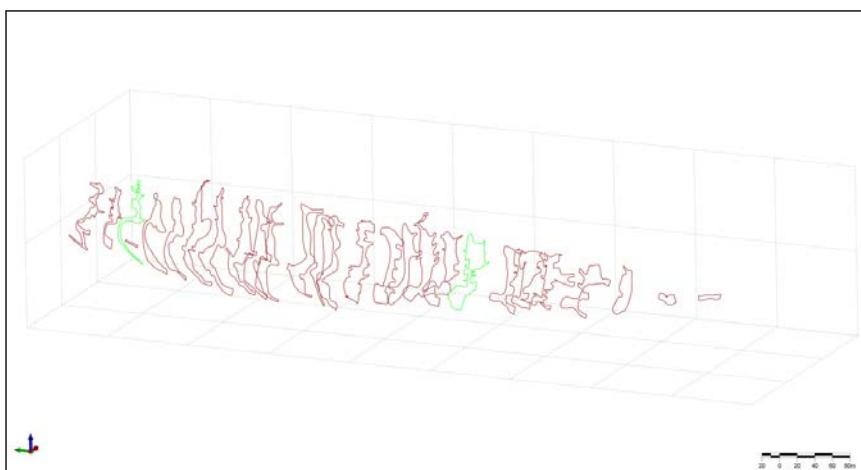


Рис. 2. Набір контурів рудного тіла по всіх профілях

Наступним кроком є почергове об'єднання контурів у суцільну каркасну модель, яка є кінцевою ціллю каркасного моделювання. Створення каркасу відбувається на основі триангуляції точок у стрінгах контурів рудного тіла в сусідніх розрізах. У Micromine представлені три методи триангуляції:

- Метод рівних кутів – створює каркасну модель із трикутників які мають рівні кути.
- Метод мінімальної площі – створює каркас із трикутниками найменшої площі.
- Метод пропорційної довжини – створює каркас таким чином, щоб дотримувалася пропорційна відстань між даними стрінгів.

Для побудови каркасу було використано метод найбільшого об'єму, який обраховує результат кожного з вище перерахованих і використовує той, при якому досягається максимальний об'єм (рис. 3).

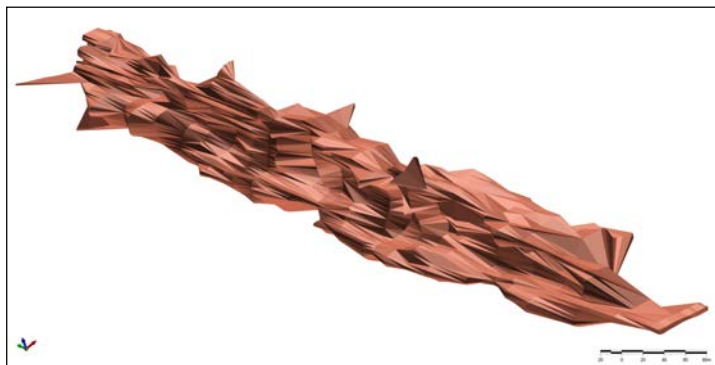


Рис. 3. Каркасна модель золоторудного родовища

### Методика умовного моделювання

Умовне моделювання (англійською *implicit modelling*) має дослівний переклад з англійської мови *неявне моделювання* – це швидке автоматичне створення поверхонь, які являють собою літологічні контакти, розломи та вмісти, безпосередньо з геологічних даних. На відміну від «явного» моделювання (*explicit modelling*), яке передбачає традиційне «ручне» каркасне моделювання.

Умовне моделювання, так само як і традиційне каркасне моделювання, широко використовується для моделювання геології та вмістів корисних компонентів і вважається передовою практикою (*good practice*) при оцінці ресурсів корисних копалин [2].

Умовне моделювання використовує функцію для розрахунку меж руди або порід. Ця функція може бути використана для побудови моделі, яка відображає собою вміст корисного компоненту, інтрузивні структури, жили, розломи, моделі підземних робіт. Умовне моделювання відкидає необхідність створення полігонів або будь-яких інших тривимірних поверхонь. Перевагою умовного моделювання є те, що воно вимагає менше часу й може бути кращим для моделювання складної геології. Умовне моделювання також може допомогти геологам виявити тенденції в геологічних даних, а також визначити розломи та складки.

В основі умовного моделювання лежать два основних алгоритми: радіальні базисні функції (іноді сплайни) та крокуючі куби. На першому етапі за допомогою радіальних базисних функцій або сплайну обчислюється зв'язок між усіма точками з відомими значеннями й створюється матриця точок зі значеннями. На другому етапі за допомогою алгоритму крокуючих кубів ізоперхня (обраного значення) візуалізується у вигляді каркасу.

В основі умовного моделювання в *Micromine* для інтерполяції даних використовуються радіально-базисні функції. Вони були визначені, як один із найбільш точних і стабільних методів розв'язання задач інтерполяції розсіяних даних.

Радіальні базисні функції (РБФ) – це група функцій, які генерують значення, залежні від відстані й використовуються для розв'язання задач інтерполяції розсіяних даних. Радіальні базисні функції забезпечують кутову симетрію – це означає, що величина змінної залежить лише від відстані.

Процес інтерполяції РБФ подібний до інтерполяції з використанням крігінгу. Відмінність між крігінгом й інтерполяцією РБФ полягає в тому, що крігінг використовує коваріаційну

функцію, отриману з даних (варіограм), а РБФ використовує базову функцію, яка обирається зі стандартного набору функцій.

Алгоритм крокуючих кубів працює з скалярним полем, обирає вісім сусідніх точок (утворюючи уявний куб), а потім визначає, які полігони необхідно побудувати для представлення частини ізоповерхні, що проходить через цей куб. Після цього всі полігони з'єднуються для створення бажаної поверхні.

Цей процес досягається за допомогою створення індексу до попередньо обчисленого масиву, який має 256 можливих конфігурацій многокутників всередині куба. Індеси формуються, порівнюючи значення кожної з восьми точок, як біт у восьмибітному цілому числі. Якщо скалярне значення більше за ізозначення (значення всередині поверхні), то відповідний біт встановлюється в одиницю, а якщо менше (ззовні) – в нуль. Потім кожна вершина створених полігонів розміщується відповідно до свого положення на ребрі куба, обчисленого за допомогою лінійної інтерполяції двох скалярних значень, що з'єднуються цим ребром.

Масив з 256 конфігурацій може бути отриманий шляхом застосування симетричних відображень та поворотів до 15 початкових випадків. Однак для отримання повноцінної поверхні необхідно використовувати більшу кількість конфігурацій (рис. 4).

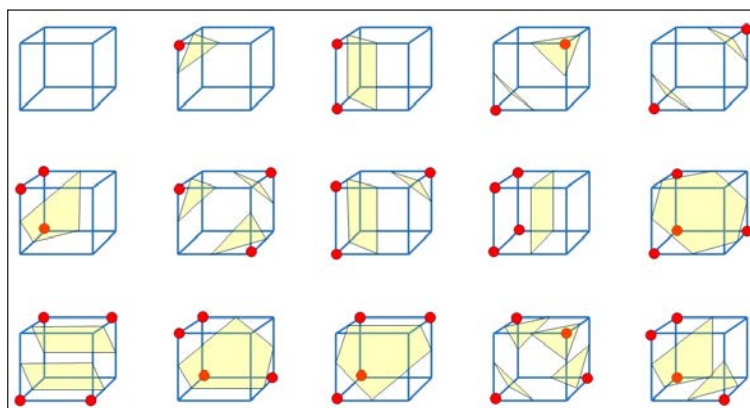


Рис. 4. Приклад 15 унікальних конфігурацій куба з 256

Варіанти триангуляції ізоповерхні з використанням алгоритму крокуючих кубів [7]. Результатом умовного моделювання родовища золота є отримана 3D модель (рис. 5).

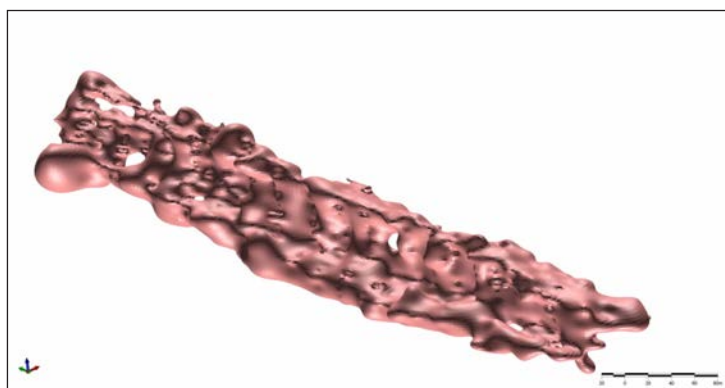


Рис. 5. Умовна(автоматична) модель золоторудного родовища

**Висновки.** Каркасне й умовне моделювання показало досить схожі результати, це видно з морфології рудних тіл, їх геологічні границі є досить близькими (рис. 6), а також з результатів підрахунку запасів (табл. 1).

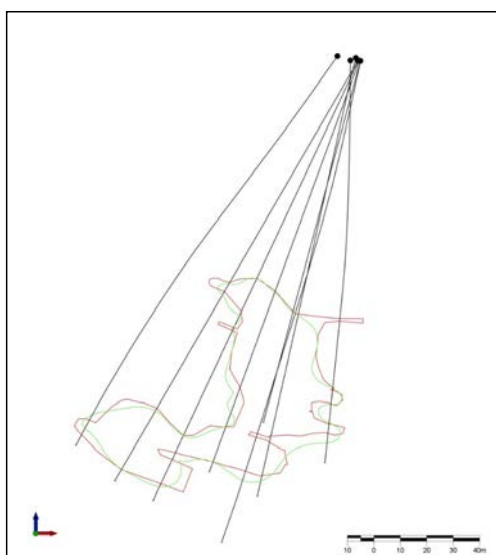


Рис. 6. Геологічні межі умовної(зелені) та каркасної(червоні) моделі

Таблиця 1

Результати підрахунку запасів за каркасною та умовною моделями

Модель	Об'єм	Тоннаж, т	Середній уміст, г/т	Запаси металу, кг
Каркасна	1 625 821	4 389 717,2	2,225	9 769,05
Умовна	1 863 225	5 030 707,5	2,238	11 258,49

Різниця в підрахунку запасів на основі каркасної та умовної моделей склала близько 13% по запасах руди та металу. Отримані результати показують, що обидва методи є прийнятними для проведення оцінки родовища корисних копалин, але вибір методу моделювання повинен ґрунтуватися з урахуванням їх особливостей.

Каркасні моделі є корисними на стадії проектування подальшої геологічної розвідки, оскільки створена модель акумулює всі дані та розуміння геології родовища й досвід інтерпретатора, завдяки чому має досить високий рівень геологічної відповідності. Важливою перевагою також є простота, яка лежить у почерговому оконтуренні рудного тіла по профілях.

На відміну від каркасних, умовні моделі є досить гнучкими й легко інтегрують нові дані в оцінку, працюючи за раніше визначеними параметрами моделювання. Вони дають змогу швидко оновлювати модель і виключити великий обсяг ручної роботи. Умовні моделі є менш геологічно передбачуваними, оскільки базуються виключно на вхідних даних та параметрах для функцій, які не включають геологічного розуміння структури та типу родовища. Проте при недотриманні регулярності геологорозвідувальної мережі або при високій складності геологічної будови коли рівень неоднозначності є досить високим, умовні моделі є більш достовірні, ніж каркасні.

Найкращим рішенням є поєднання обох методів, використовуючи їх сильні сторони. Умовний метод моделювання автоматично та швидко генерує моделі, які можуть допомагати в інтерпретації або вказувати на області, де потрібно більше геологічної інформації. Це дає змогу використовувати умовні моделі, як додатковий інструмент для ручного моделювання у процесі інтерпретації розрізів. Це дозволяє постійно покращувати модель, роблячи її більш точною та досконалою.

За результатами досліджень була створена порівняльна таблиця методів каркасного та умовного моделювання (табл. 2).

Таблиця 2

**Порівняння параметрів методів каркасного та умовного моделювання**

Параметр	Каркасне моделювання	Умовне моделювання
Створення доменів	Може бути одним із найбільш трудомістких етапів	Може використовувати або не використовувати домени
Суб'єктивність	Залежить від досвіду та компетенцій інтерпретатора	Базується виключно на вхідних даних та параметрах для функцій
Форма	З вираженими гранями та вершинами	Згладжена
Контроль	У процесі ручного моделювання	Після створення моделі
Регулярність даних	Потребує регулярних даних	Використовує нерегулярні дані (ділянки з різною щільністю буріння)
Кількість ручної роботи	Моделювання відбувається в ручному, частково – в напівавтоматичному режимі	Автоматичне моделювання на основі заданих параметрів
Швидкість	Ручне моделювання потребує багато часу	Основний час займає налаштування параметрів моделювання, процес моделювання – швидкий
Оновлення моделі	Повторне моделювання	Автоматичне оновлення моделі за тими ж параметрами

**Новизна дослідження.** Оцінка запасів золоторудного родовища з використанням просторових моделей, створених різними методами. Порівняння базових алгоритмів, які лежать в основі каркасного та умовного моделювання, а також порівняння результатів отриманих під час їх використання. Створення порівняльного переліку, в якому описані відмінності алгоритмів умовного та каркасного моделювання.

**Список використаних джерел:**

1. Баряцька Н.В., Гейченко М.В., Сафронова Н.Г. Основні етапи тривимірного моделювання на прикладі Шевченківського родовища літєвих руд. *V міжнародна науково-практична конференція «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування»*, у 2 т. (8–12 жовтня 2018 р., м. Трускавець). Київ : ДКЗ, 2018. Т. 1. С. 211–217.
2. Barnes J. F. H., Gossage B.L. The Do's and Don'ts of Geological and Grade Boundary Models and What You Can Do About It. *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation. The AusIMM Guide to Good Practice*. Second edition. AusIMM, 2014. P. 175–188.
3. Bariatska N. Micromine Tools for Geological and Economic Assessment of Mineral Projects. *Conference: 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 15–18 November 2022, Kyiv, 2022, Vol. 2022, P. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.2022580150>.
4. Benyu Li, Deyun Zhong and Liguan Wang. Repair of Geological Models Based on Multiple Material Marching Cubes. *Mathematics*. 2021. No 9 (18). 2207. <https://doi.org/10.3390/math9182207>.
5. Guo Jia-teng, Wu Li-xin, Zhou Wen-hui. Automatic ore body implicit 3D modeling based on radial basis function surface. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*. 2016. Vol. 41. No 8. P. 2130–2135. DOI: <http://dx.doi.org/10.13225/j.cnki>.
6. Mc Lennan J., Deutsch C.V. Boundsim: Implicit Boundary Modeling, *APCOM 2007*. Santiago, Chile, April 2007, 9 p.
7. Ouyang, J., Zhang, G., Cao, P., Li, W. A Three-Dimensional Geological Modelling Method Using a Modified Marching Cubes Algorithm. *Elsevier BV*. 2023. 32 p. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4624601>.
8. Souza F.S. Uso de métodos geoestatísticos no auxílio da modelagem geológica. 2007, 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2007.
9. Yamamoto J.K. (ed.). Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo: EDUSP, 2001. 232 p.



**References:**

1. Baryatska, N.V., Heichenko, M.V., & Safronova, N.G. (2018). Basic stages of three-dimensional modeling using the example of the Shevchenkivske lithium ore deposit. *V International Scientific and Practical Conference "Subsoil Use in Ukraine. Investment Prospects"*, in 2 vols. (8–12 October 2018, Truskavets). Kyiv: DKZ, 1, 211–217 [In Ukrainian].
2. Barnes, J.F.H. & Gossage, B.L. (2014). The Do's and Don'ts of Geological and Grade Boundary Models and What You Can Do About It. *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation. The AusIMM Guide to Good Practice*. Second edition. AusIMM, 175–188.
3. Bariatska, N. (2022). Micromine Tools for Geological and Economic Assessment of Mineral Projects. *Conference: 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 15–18 November 2022, Kyiv, 2022, 1–5. <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.2022580150>.
4. Benyu Li, Deyun Zhong & Liguang Wang. (2021). Repair of Geological Models Based on Multiple Material Marching Cubes. *Mathematics*, 9(18),2207. <https://doi.org/10.3390/math9182207>
5. Guo, Jia-teng, Wu, Li-xin, & Zhou, Wen-hui. (2016). Automatic ore body implicit 3D modeling based on radial basis function surface. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 41(8), 2130–2135. <http://dx.doi.org/10.13225/j.cnki>.
6. Mc Lennan, J., & Deutsch, C.V. (2007) Boundsim: Implicit Boundary Modeling, In: *APCOM 2007*. Santiago, Chile, April 2007, 9.
7. Ouyang, J., Zhang, G., Cao, P., & Li, W. (2023). A Three-Dimensional Geological Modelling Method Using a Modified Marching Cubes Algorithm. *Elsevier BV*, 32. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4624601>.
8. Souza, F.S. (2007). Uso de métodos geoestatísticos no auxílio à modelagem geológica. 2007. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre [In Portuguese].
9. Yamamoto, J.K. (2001). Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo: EDUSP, 232 [In Portuguese].

Стаття надійшла до редколегії  
17.06.2024 р.