

УДК 622.1:622.271.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-33>

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЇ ГЕОМЕТРИЗАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Переметчик Андрій Валерійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри маркшейдерії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0001-6274-146X

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

Письменний Сергій Васильович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри підземної розробки корисних копалин
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0001-5384-6972

Федоренко Сергій Олександрович,

старший викладач кафедри відкритих гірничих робіт,
заступник декана гірничо-металургійного факультету
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0001-5753-9603

У статті розглянуто методику комплексної геометризації родовища корисних копалин. На основі розвитку наявних концепцій геометризації було розроблено комплекс методів побудови геометричної моделі родовища корисних копалин. У процесі геометризації родовищ корисних копалин автори дослідження широко використовують геоінформаційні системи. Результати геологічної розвідки та маркшейдерських спостережень були використані як основа для геометризації. Під час створення методики оцінки запасів родовища корисних копалин були розглянуті найбільш використовувані методи гірничо-геометричної оцінки. Найбільш ефективним способом оцінки запасів покладів складної геометричної форми є модифікований метод паралельних вертикальних перерізів. У ході дослідження авторами була розроблена методика визначення оптимального положення ділянок відносно родовища корисних копалин, об'єм яких оцінюється. У процесі геометризації використовуються геостатистичні методи оцінки, які програмно реалізуються в геоінформаційних системах, а також багатовимірний евристичний метод оцінки, розроблений авторами дослідження. Такий набір гірничо-геометричних методів дає можливість поточно і прогнозно геометризувати родовище корисних копалин, а також оцінити його запаси. Цифрова модель родовища, побудована на основі результатів маркшейдерських вимірювань і геологічної розвідки, дає можливість комплексно виконати гірничо-геометричну оцінку родовища корисних копалин. Така модель може бути якісною основою для виконання гірничих і геометричних розрахунків, створення гірничої та графічної документації, а також для побудови топографічних поверхонь і розрахунку об'ємів корисних копалин. Створений авторами дослідження метод комплексної геометризації родовищ корисних копалин дає можливість раціонально планувати гірничі роботи та підвищувати ефективність роботи гірничого підприємства.

Ключові слова: комплексна методологія геометризації, геоінформаційна система, геостатистичні методи оцінювання, багатовимірний метод евристичного оцінювання, паралельні вертикальні перерізи.

Peremetchyk Andrii, Lutsenko Serhii, Hryhoriev Yulian, Pysmennyi Serhii, Fedorenko Serhii. Method of complex geometrization of mineral deposit indicators

The article is devoted to the task of creating a method for complex geometrization of a mineral deposit. Based on the development of existing geometrization concepts, a set of methods for constructing a geometric model of a mineral deposit was developed. In the process of geometrization of mineral deposits, the authors of the study widely use geoinformation systems. The results of geological exploration and surveying observations were used as the basis for geometrization. When creating a methodology for estimating mineral deposit reserves, the most widely used methods of mining and geometric estimation were considered. The most effective method for estimating reserves of deposits of complex geometric shape is the modified method of parallel vertical cross-sections. During the study, the authors developed a methodology for determining the optimal position of cross-sections relative to the mineral deposit, the volume of which is estimated. In the process of geometrization, geostatistical estimation methods are used, which are programmatically implemented in geoinformation systems, as well as a multidimensional heuristic estimation method developed by the authors of this study. Such a set of mining and geometric methods makes it possible to geometrize a mineral deposit currently and predictably, as well as to estimate its reserves. A digital model of the deposit, built on the basis of the results of surveying measurements and geological exploration, makes it possible to comprehensively perform a mining and geometric estimation of a mineral deposit. Such a model can be a high-quality basis for performing mining and geometric calculations, creating mining and graphic documentation, as well as for constructing topographic surfaces and calculating mineral volumes. The method of complex geometrization of mineral deposits created by the authors of the study makes it possible to rationally plan mining operations and increase the efficiency of the mining enterprise.

Key words: complex geometrization methodology, geoinformation system, geostatistical assessment methods, multidimensional heuristic estimation method, parallel vertical cross-sections.

Вступ. Удосконалення технології видобутку корисних копалин ґрунтується на використанні інформації про геометричну структуру родовища корисних копалин [1]. Ефективне проектування гірничодобувного підприємства здійснюється за рахунок геометрично обґрунтованих параметрів гірничих робіт. Ефективні показники видобутку корисних копалин з надр є пріоритетним завданням гірничих підприємств.

На родовищах корисних копалин з високою мінливістю геологічних показників виникає проблема оцінки просторового розподілу корисних копалин. Це призводить до зниження ефективності оцінки запасів корисних копалин, що проводиться за результатами геологічної розвідки. Геостатистичні методи та методи евристичної самоорганізації оцінки геологічних показників родовища дають змогу знизити вплив мінливості на оцінку запасів корисних копалин, а також дають можливість виконати більш точну оцінку розташування геологічних показників родовища корисних копалин [2; 3].

Таким чином, метою дослідження є створення методу геометризації, що дає змогу провести комплексну гірничо-геометричну оцінку родовища корисних копалин і забезпечує ефективну роботу гірничого підприємства.

Методи та методики дослідження. Основна маса досліджень, присвячених геометризації родовищ корисних копалин, базується на концепції професора П.К. Соболевського про геометризацію форм, властивостей, умов залягання гірських порід і процесів, що відбуваються в надрах.

На основі цієї концепції геометризації авторами дослідження розроблені графічні та

аналітичні методи побудови гірничо-геометричної моделі родовища, запропоновані методи оцінки родовищ різної геометричної форми, а також розроблені методи оцінки запасів корисних копалин. Авторами роботи також був створений комплексний метод геометризації родовищ корисних копалин.

Просторове розміщення будь-якого показника P може бути визначене в системі просторово-часових координат $P = f(x, y, z, t)$. При цьому розташування показника у просторовій системі координат прийнято називати геохімічним полем. Система показників поля, що перебуває в просторі, називається просторово-факторним полем.

Кожен показник такого поля може бути формально описаний окремо та існувати як просторово-факторне поле окремого показника. У всій своїй сукупності комплекс різних показників родовища задається системою просторово-факторних полів окремих показників.

Істотним недоліком поняття геометризації, заснованого на понятті геохімічного поля і топографічної поверхні, є те, що в цій системі прийнято зображати просторове розташування тільки одного показника поля.

В умовах високої мінливості показників родовища корисних копалин доцільно використовувати геостатистичні методи оцінки, які дають змогу виявити закономірності, що існують на родовищі корисних копалин, і підвищити точність оцінки його запасів. Геостатистичний аналіз родовища дає можливість оцінити взаємозв'язок між параметрами геологорозвідувальної мережі і варіативності, уточнити розподіл якісних показників родовища, а також

підвищити точність оцінки запасів родовища. Геостатистичний метод крігінгу детально реалізований в геоінформаційних системах, що використовуються для геометризації родовищ корисних копалин [4].

У рамках комплексної методики геометризації родовищ корисних копалин авторами дослідження розроблено метод гірничо-геометричного моделювання, заснований на багатовимірній евристичній самоорганізації функції розміщення показників родовища [5]. Функція виглядає так:

$$f_i = [c_i^p (a_{11}^p x_1^p + b_{11}^p x_1^p)^p \cdot (a_{12}^p x_2^p + b_{12}^p x_2^p)^p \dots \times \\ \times (a_{1n}^p x_n^p + b_{1n}^p x_n^p)^p \cdot (a_{21}^p x_1^p + b_{21}^p x_1^p)^p \times \quad (1) \\ \times (a_{22}^p x_2^p + b_{22}^p x_2^p)^p \dots (a_{mn}^p x_n^p + b_{mn}^p x_n^p)^p],$$

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = d_i^p [f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ + f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \dots + f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)]^p + e^p, \quad (2)$$

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = g^p [F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ + F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \dots + F_n(x_1, x_2, \dots, x_n)]^p + h^p, \quad (3)$$

де x – аргументи функції, які визначаються за достовірними даними геологічної розвідки;

a, b, c, e, g, h – числові коефіцієнти, отримані в процесі моделювання;

p – показник ступеня, обчислений за виразом (3).

У формулах (1)–(3) в процесі повторюваних циклів розрахунків математична модель родовища удосконалюється. Пошук функціонального взаємозв'язку між показниками родовища відбувається на видобутих ділянках родовища. У процесі розрахунків визначаються фактори, які найбільше впливають на розподіл модельованого показника. Таким чином, визначається оптимальний тип функціональної залежності між геологічними показниками. Цикли розрахунків виконуються за критерієм підвищення точності моделювання. Сукупність алгоритмів, що входять в описуваний метод моделювання, робить цю математичну модель дуже гнучкою, що дає можливість використовувати її в складних гірничо-геологічних умовах на родовищах з високою мінливістю геологічних показників. Це дає можливість описати дуже складні математичні залежності між геологічними показниками, виявити закономірність багатовимірного геохімічного поля, а також оцінити похибку моделювання.

Створена авторами дослідження комплексна методика геометризації родовищ корисних копалин широко використовує геоінформаційні системи, такі як Micromine, K-mine, Surfer, Autocad. В цих системах є детально реалізовані способи оцінки та геометризації родовищ

корисних копалин. До цих способів належать геостатистичні способи оцінки родовищ корисних копалин, які викликають особливий інтерес з огляду на складні умови геометризації родовищ корисних копалин. Ця методика була застосована для геометризації українських родовищ корисних копалин різної форми і складності.

Гірничодобувні підприємства найчастіше використовують для підрахунку запасів твердих корисних копалин такі методи, як спосіб вертикальних та горизонтальних перерізів, спосіб середнього арифметичного, спосіб геологічних блоків, спосіб експлуатаційних блоків, спосіб багатокутників, спосіб трикутників, спосіб ізоліній, спосіб ізогіпс, спосіб середнього кута падіння, спосіб ділянок однакових кутів падіння.

Метод паралельних перерізів найбільш поширений під час підрахунку запасів рудних родовищ, оскільки ці родовища відрізняються дуже мінливою морфологією і нерівномірним розподілом корисного компоненту. За способу перерізів тіло корисної копалини розбивається на низку блоків, розташованих між паралельними лініями геологорозвідувальної мережі.

Залежно від геологорозвідувальної мережі, може застосовуватись метод вертикальних або горизонтальних перерізів. Наприклад, якщо родовище розвідувалось профілями вертикальних або похилих свердловин, підрахунок методом вертикальних перерізів забезпечує якнайповніше безпосереднє використання усіх геологічних даних, отриманих під час геологорозвідувального буріння.

Для застосування методу горизонтальних перерізів в цьому разі необхідно усереднювати геологічні дані, отримані з цих свердловин, і проєктувати їх у вигляді окремих точок на площину горизонтального перерізу, що ускладнює підрахунок запасів корисних копалин і знижує його достовірність. Навпаки, за наявності низки поверхів гірничих виробок з підземними горизонтальними свердловинами доцільніше вести підрахунок запасів корисних копалин за допомогою горизонтальних перерізів.

Величезною перевагою методу паралельних перерізів є те, що він дає змогу чітко показати геологічні особливості родовища, а саме: морфологію тіл корисних копалин, розподіл окремих типів і сортів руд, характер зміни мінералізації з падіння, простягання і потужності покладу. Цей метод дає можливість підраховувати запаси за вкрай складних контурів покладів та наявності рудних або нерудних шарів.

Об'єм блоку в загальному випадку використання методу паралельних ділянок розраховується за формулою:

$$V = I_1 \left(\frac{S_1 + S_2}{2} \right) + I_2 \left(\frac{S_2 + S_3}{2} \right) + \dots + I_n \left(\frac{S_n + S_{n+1}}{2} \right), \quad (4)$$

де S – площа поперечного перерізу;

I – нормальна відстань між ділянками;

n – кількість секцій.

Під час використання методу перерізів по кожному перерізу визначається площа рудного тіла. Площі перерізів переважно визначаються автоматизованими методами, виходячи з відомих планово-висотних координат цифрової моделі перерізів. Залежно від форми і відносних розмірів площ у сусідніх перерізах, об'єми блоків обчислюються за формулами піраміди, усіченої піраміди, конуса, клину тощо. Середній вміст корисних компонентів по перерізах визначається як середньозважений вміст по рудних інтервалах окремих виробок. За нерівномірної мережі геологічного опробування родовища корисних копалин вміст корисного компонента доцільно визначати як середньозважений по площі блоку з використанням геостатистичних методів оцінки, таких як крігінг.

Щодо розмірів блоків слід керуватися наведеними вище даними. Переважно блоки виділяються між двома геолого-розвідувальними профілями, але за густої мережі геолого-розвідувальних виробок можливе включення у блок декількох перерізів.

За великої протяжності тіл корисних копалин з падіння блоки, що утворюються двома перерізами, виявляються надмірно великими, тож їх доцільно розбити на декілька самостійних блоків, особливо коли є значні зміни по вертикалі в характері розподілу корисної копалини.

Більшість покладів корисних копалин обмежена складними поверхнями. Точне відтворення і визначення їх за даними розвідки неможливе. Тому всі способи підрахунку запасів, які спираються на матеріали геологічної розвідки, ґрунтуються на принципі трансформації складних тіл у простіші тіла, в межах яких проводиться підрахунок запасів.

Розрахунок об'ємів методом вертикальних перерізів використовується для розрахунку об'ємів складних блокових фігур, що складаються з об'єктів різного типу, які можуть перебувати в декількох різних шарах або уступах кар'єру і мають складний профіль перерізу.

Результати. Розроблена у дослідженні методика геометризації родовищ корисних копалин була застосована для геометризації та моделювання українських родовищ корисних копалин. Для прикладу розглянемо геометризацію родовища кар'єру «Південний ГЗК».

Особливістю розрахунку об'ємів способом розрізів в геоінформаційних системах, що застосовуються в цьому дослідженні, є те, що на первинному етапі виконується побудова триангуляційних поверхонь.

Об'єм між двома триангуляційними поверхнями може бути визначений в межах заданої площі родовища корисних копалин, обмеженої замкнутим контуром.

У цьому методі інформація про стан поверхні кар'єру на початку і в кінці певного інтервалу часу використовується для розрахунку об'ємів, з можливістю визначення об'ємів в межах замкнутого контуру або декількох контурів. Для цього необхідно мати положення кар'єру на початок і кінець звітної періоду в різних шарах моделі. На основі цих даних визначається контур запасів корисних копалин, в межах якого проводиться оцінка.

Далі по триангуляційних поверхнях виконується операція їх перетину з вертикальними площинами і визначаються контури фігур цих перерізів. Надалі задача зводиться до стандартної задачі підрахунку об'ємів методом паралельних перерізів (рис. 1).

Цей метод заснований на методі паралельних вертикальних розрізів і передбачає наявність цифрової поверхні кар'єру на початку видобутку родовища корисних копалин і цифрової поверхні кар'єру в кінці розроблення родовища. Враховується також контур або сукупність контурів, що дає змогу розділити визначені об'єми гірської маси на категорії. До таких категорій належать, наприклад, розвідані промислові запаси корисних копалин, підготовлені та готові до видобутку запаси корисних копалин, технологічні запаси корисних копалин на окремих гірничих горизонтах, балансові та позабалансові запаси в межах геологічних контурів, запаси з певним вмістом корисного компонента.

При цьому формується пакет звітної документації щодо розрахунковою фігурою і виконуються усі необхідні побудови. Звіт містить розрахункову таблицю з показниками розрахунку площ по кожному перерізу, а також графічне представлення кожного вертикального перерізу в заданому масштабі (рис. 2).

У способах горизонтальних і вертикальних розрізів використовувалися ділянки, розташовані радіально, паралельно і довільно відносно одна одної. Було визначено, що кожен зі способів дає більш точні результати для певних форм визначених фігур. Наприклад, за методу паралельних вертикальних ділянок виходить більш достовірний об'єм під час оцінювання рівного витягнутого блоку. Застосування радіального

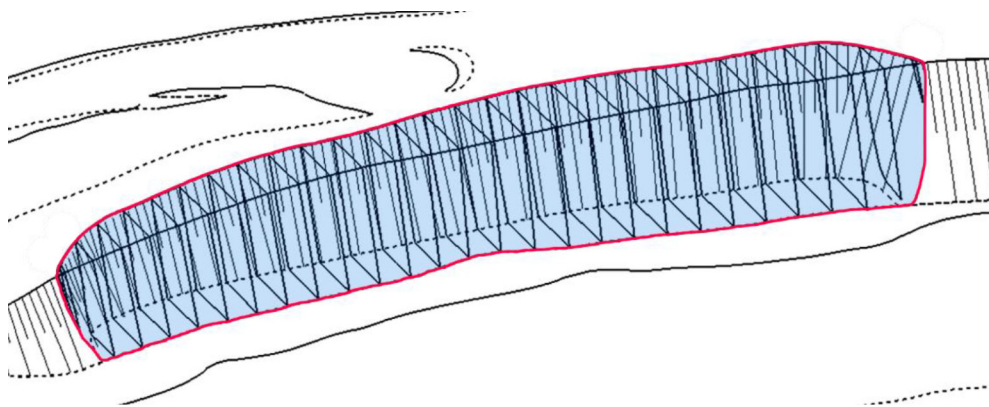


Рис. 1. Фрагмент триангуляційної поверхні гірничого блоку, розділений площинами паралельних перерізів

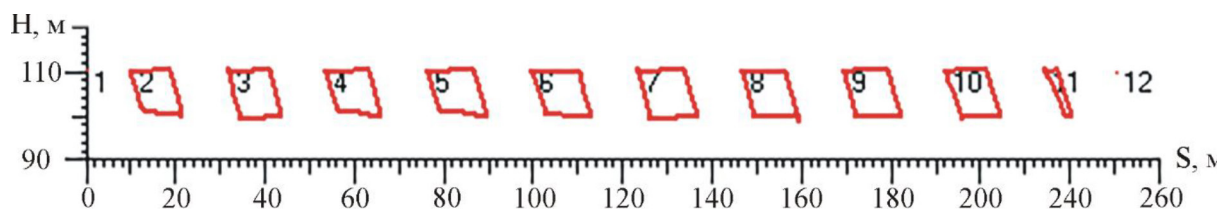


Рис. 2. Формування перерізів для визначення об'єму

розташування вертикальних паралельних блоків дає змогу домогтися більш високої точності під час оцінювання блоків з округлою формою. Це логічно зрозуміло, оскільки ці методи були розроблені для визначення об'єму маси гірських порід у блоках, які мають геометричну форму, що відповідає цим методам. Для універсалізації розташування вертикальних ділянок був використаний спосіб, коли для розташування ділянок використовувалася точка центру ваги поверхні, що утворилася в результаті замикання контуру, в межах якої визначається об'єм на плані. Через цю поверхню в північному напрямку була проведена лінія простягання блоку, перпендикулярно якій були побудовані вертикальні ділянки. Після цього лінію повертали на кут в один градус і процедуру повторювали. Отримані таким чином об'єми зводяться в таблицю розрахункових об'ємів блоків. За результатами цих операцій були визначені кутові інтервали, в межах яких розрахункові значення об'ємів не змінювалися. Ці інтервали були об'єднані для отримання мінімальних кутів повороту для розрахунків об'ємів, які коливаються в різних родовищах. Це пов'язано з використанням різних систем розробки. Кути повороту, за яких були отримані різні значення об'ємів блоку, стали контрольними значеннями для оцінки запасів корисних копалин блоку.

Розрахунок об'ємів проводився для відпрацювання блоків різної форми кар'єру «Південний ГЗК» задля з'ясування впливу різної форми підрахованих фігур на точність підрахунку. На

різних горизонтах були вибрані три форми гірничого блоку: рівний витягнутий блок, блок з різко закругленою формою і проміжний варіант.

При цьому було відзначено, що зменшення відстані між ділянками приводить до зменшення різниці між отриманими максимальними і мінімальними значеннями об'ємів, розрахованими для всіх варіантів розвороту секцій. Тому другим етапом експерименту стала спроба скоротити відстань між секціями до оптимального значення. Для цього об'єм у заданих блоках обчислювався кілька разів з поступовим фіксованим зменшенням відстані між секціями. Для розрахунку об'ємів були вибрані такі відстані між секціями: 20 м; 10 м; 5 м; 2 м і 1 м (рис. 3).

Під час аналізу отриманих результатів дійшли висновку, що за деякого зменшення відстані між секціями числові значення розрахункових об'ємів блоку рівні за різних орієнтацій ділянок відносно центру мас поверхні, утвореної замкнутим обмежувальним контуром. Також обчислені значення об'єму дорівнювали значенням, отриманим під час обчислення об'ємів іншими методами. Звідси випливає висновок, що цей метод можна використовувати як універсальний для будь-якої геометричної форми блоку, причому не тільки без втрати необхідної точності, але й навпаки, з її збільшенням. Підрахунок об'ємів точніший за рахунок більшої кількості перерізів, які описують контур фігури, об'єм якої підраховується більш детально. Емпіричним шляхом були отримані оптимальні відстані між поперечними перерізами,

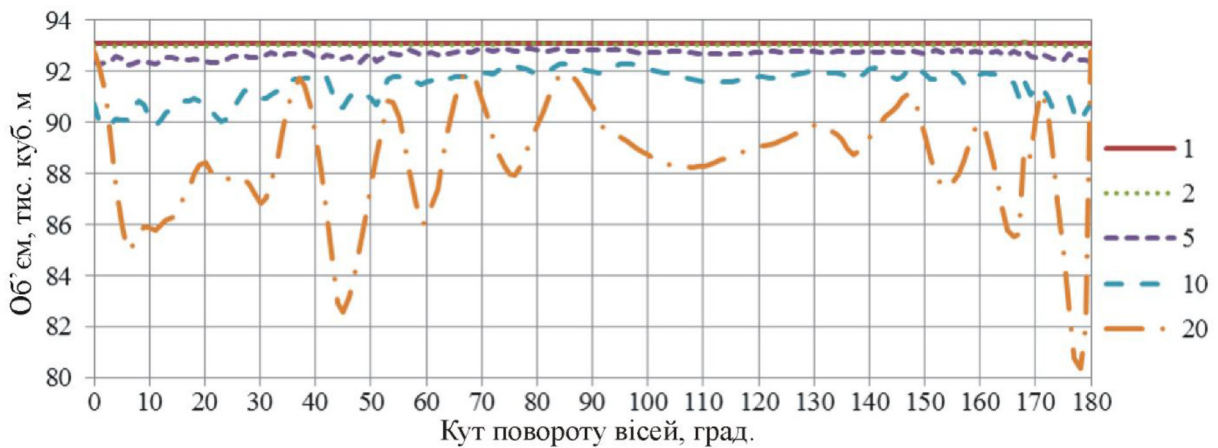


Рис. 3. Залежність підрахованого об'єму гірничо-видобувного блоку складної геометричної форми від напрямку лінії вертикальних перерізів за різних значень відстані між перерізами: 1, 2, 5, 10, 20 – залежності на відстанях, відповідно 1 м, 2 м, 5 м, 10 м і 20 м

використання яких підтвердило ефективність використання методу паралельних вертикальних перерізів, який програмно реалізований в геоінформаційних системах. Особливістю методу є можливість автоматичного позиціонування поперечних перерізів на оптимальних відстанях завдяки використанню геоінформаційних систем. При цьому немає необхідності використовувати інші методи розрахунку об'єму окремих блоків різної геометричної форми.

Комплексну оцінку та геометризацию родовища корисних копалин проводили з використанням методів геостатистичної оцінки, впроваджених у геоінформаційних системах, а також з використанням евристичних методів оцінки, розроблених авторами дослідження. В результаті комплексної геометризації отримано

гірничо-геометричні моделі розподілу запасів корисних копалин кар'єру Слов'янського заводу крейдяних вапняків та родовища кар'єру «Південний ГЗК» (рис. 4).

Отримана гірничо-геометрична модель родовища дає можливість ефективно планувати гірничі роботи як на короткі, так і на тривалі періоди часу гірничого підприємства. Модель описує фактичний і прогнозований розподіл корисних копалин по площі і глибині родовища корисних копалин. Модель дає можливість геометризувати мінеральні поклади складних геометричних форм з різними деталями. Результати геометризації окремих ділянок родовища служать основою для створення комплексної гірничо-геометричної моделі родовища корисних копалин.

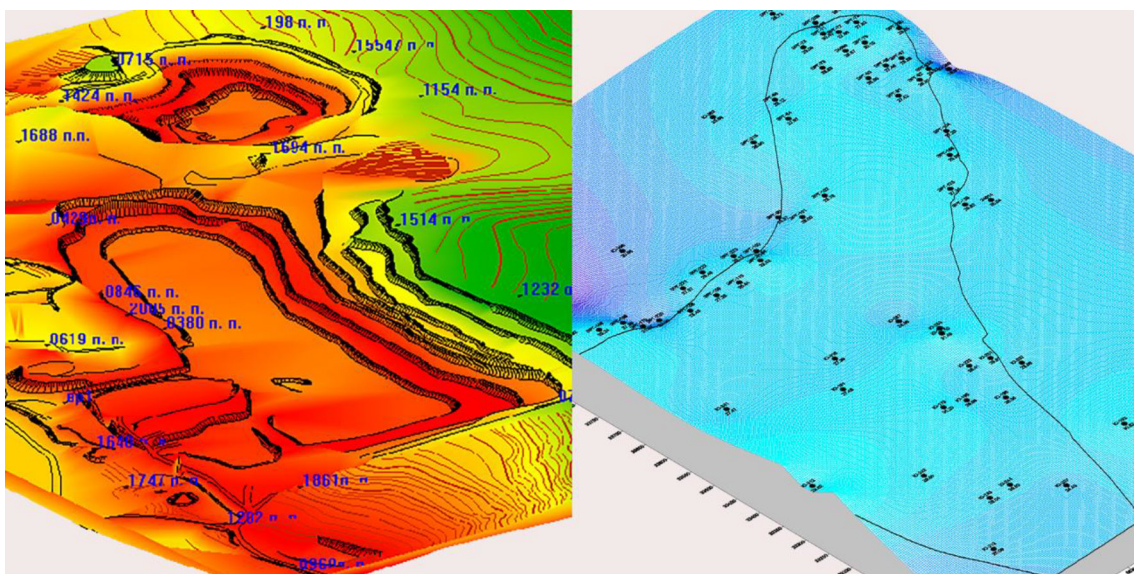


Рис. 4. Гірничо-геометричні моделі розподілу запасів родовищ кар'єру Слов'янського заводу крейдяних вапняків та кар'єру «Південний ГЗК»

Висновки. Таким чином, розроблений авторами дослідження комплексний метод геометризації родовища корисних копалин дає змогу ефективно геометризувати родовище корисних копалин. Сукупність методів, що входять у методику, дає змогу оцінювати і розраховувати запаси родовища корисних копалин з похибкою не більше 6–8 % залежно від величини варіативності показників родовища. Це дає можливість раціонально вести гірничі роботи і видобувати

корисні копалини з надр з максимальною ефективністю.

Подальший розвиток методики геометризації родовищ корисних копалин полягає в розробленні методів, заснованих на детальній геометризації ділянок родовищ корисних копалин, а також розробленні і створенні геостатистичних та евристичних методів оцінки, що дають змогу виконувати комплексну геометризацию родовищ корисних копалин різної геометричної складності.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ступнік М. І., Федько М. Б., Письмений С. В., Колосов В. О., Курносів С. А., Маланчук З. Р. Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу. *Вісник Криворізького національного університету: збірник наукових праць*. 2018. Т. 16. № 2. С. 3–8.
2. Переметчик А. В., Федоренко С. О., Подойніцина Т. О. Геометричне моделювання та прогнозування якості залізних руд. *Гірничий вісник: науково-технічний збірник*. 2023. Т. 57. № 1. С. 46–54.
3. Huang, S., Huaming, A. (2016). Application of geostatistics in the estimation of Sujishan graphite deposits, Mongolia Statebn'i obzor. *Civil Engineering Journal*, 27, 487–499. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2018.04.0039>
4. Peremetchyk, A., Chukharev, S., Dmytrenko, V., Pysmennyi, S., Fedorenko, S., Mutambo, V. (2024). Application of geometrization to estimate mineral deposit reserves. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (1415), 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012025>
5. Peremetchyk, A., Kulikovska, O., Shvaher, N., Chukharev, S., Fedorenko, S., Moraru, R., Panayotov, V. (2022). Predictive geometrization of grade indices of an iron-ore deposit. *Mining of Mineral Deposits*, 16 (3), 67–77. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.067>

REFERENCES:

1. Stupnik, M. I., Fedko, M. B., Pysmenyi, S. V., Kolosov, V. O., Kurnosov, S. A., Malanchuk, Z. R. (2018). Problemy rozkryttia ta pidhotovky rudnykh rodovysch na hlybokykh horyzontakh shakht Kryvbasu [Problems of opening and preparation of ore deposits in deep horizons of Kryvbas mines]. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu: zbirnyk naukovykh prats – Journal of Kryvyi Rih National University*, 16 (2), 3–8. [in Ukrainian].
2. Peremetchyk, A. V., Fedorenko, S. O., Podoinitsyna, T. O. (2023). Heometrychne modeliuвання ta prohnozuvannya yakosti zaliznykh rud [Geometric modeling and forecasting of the quality of iron ores]. *Hirnychy visnyk: nauково-tekhnichnyi zbirnyk – Mining Journal of Kryvyi Rih National University*, 57(1), 46–54. [in Ukrainian].
3. Huang, S., Huaming, A. (2016). Application of geostatistics in the estimation of Sujishan graphite deposits, Mongolia Statebn'i obzor. *Civil Engineering Journal*, 27, 487–499. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2018.04.0039>
4. Peremetchyk, A., Chukharev, S., Dmytrenko, V., Pysmennyi, S., Fedorenko, S., Mutambo, V. (2024). Application of geometrization to estimate mineral deposit reserves. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (1415), 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012025>
5. Peremetchyk, A., Kulikovska, O., Shvaher, N., Chukharev, S., Fedorenko, S., Moraru, R., Panayotov, V. (2022). Predictive geometrization of grade indices of an iron-ore deposit. *Mining of Mineral Deposits*, 16 (3), 67–77. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.067>

Стаття надійшла: 29.08.2025

Стаття прийнята: 21.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

