

Особливості геометризації родовищ різних типів корисних копалин



Геометризація родовищ корисних копалин є просторово-математичним моделюванням надр, що забезпечує достовірне відображення форми, умов залягання та внутрішньої структури покладів. Цей процес включає створення системи графоаналітичних моделей, які характеризують просторове розміщення геологічних параметрів, технологічних властивостей та гірничо-геологічних умов розробки родовищ.

Кожен тип корисних копалин має специфічні особливості геометризації: для облицювального каменю важливе значення має тріщинуватість та блочність; для вугілля – марочний склад, зольність та потужність пластів; для залізних руд – вміст заліза та шкідливих домішок; для кольорових металів – структурно-морфологічні особливості рудних тіл; для золота – характер розподілу вмісту металу та коефіцієнт рудоносності. Правильна геометризація цих параметрів забезпечує раціональне проектування гірничих робіт та оптимальне управління якістю видобутої сировини.

Поняття геометризації родовищ



Визначення

Геометризація родовищ – це комплекс геолого-математичних методів вивчення і графо-аналітичного відображення форми, умов залягання, внутрішньої будови тіл корисних копалин та закономірностей розподілу в них якісних показників (вміст корисних і шкідливих компонентів) і кількісних параметрів (потужність, об'єм, площа).



Мета

Точне встановлення форми і просторового розміщення тіл корисних копалин, визначення закономірностей зміни показників якості у тривимірному просторі, виявлення тектонічних порушень (скидів, насувів, флексур) та їх впливу на умови розробки для мінімізації геологічних ризиків при експлуатації родовища.



Результат

Створення детальної геометричної основи (у вигляді планів, розрізів, блокових моделей) для підрахунку запасів за категоріями А, В, С1, С2 та забезпечення раціонального планування гірничо-експлуатаційних робіт, що дозволяє оптимізувати процес видобутку, контролювати якість сировини та мінімізувати втрати корисних копалин.



Етапи геометризації родовищ



Збір та аналіз вихідних даних

Формування бази даних з координат свердловин (X, Y, Z), результатів хімічних та мінералогічних аналізів проб, даних каротажу (магнітний, гамма, електричний), матеріалів підземних та наземних маркшейдерських зйомок масштабу 1:1000-1:5000.



Побудова геологічної моделі родовища

Розробка стратиграфічних колонок, поперечних і поздовжніх розрізів у масштабі 1:500-1:2000, виділення промислових контурів з бортовим вмістом корисного компонента (напр. для залізних руд - $Fe > 20\%$), картування розломів з амплітудою зміщення $> 5\text{м}$.



Побудова геометричних графіків

Створення планів ізогіпс покрівлі та підшви з перетином через 10-20м, карт ізопотужностей із кроком 5м, карт ізовмістів корисних (Cu, Zn, Au) та шкідливих (As, S, P) компонентів, карт коефіцієнту тріщинуватості та блочності для родовищ облицювального каменю.



Аналіз отриманих даних

Статистична обробка даних з визначенням коефіцієнтів варіації показників ($V=10-120\%$), кореляційний аналіз взаємозв'язків між вмістами компонентів ($r=\pm 0,3-0,9$), виявлення напрямків максимальної мінливості показників, розрахунок анізотропії родовища за методом еліпсоїдів.



Створення цифрової моделі родовища

Розробка каркасної та блокової моделі в спеціалізованому ПЗ (Micromine, Surpac, Datamine), формування блоків розміром $5 \times 5 \times 5\text{м}$ або $10 \times 10 \times 5\text{м}$ залежно від щільності розвідувальної мережі, оцінка достовірності моделі методом крос-валідації з похибкою не більше 15-20%.

Специфіка родовищ облицювального каменю

Масивність тіл

Родовища представлені великими масивами магматичних (граніти, габро) та метаморфічних (мармур) порід об'ємом від сотень тисяч до мільйонів кубічних метрів, що вимагає специфічної методики геометризації та кваліметричної оцінки.

Декоративні властивості

Колір (хроматичні характеристики), текстура (рівномірнoзерниста, порфіровидна), малюнок (плямистий, смугастий, хмароподібний) оцінюються за 5-бальною шкалою декоративності та визначають комерційну цінність облицювального каменю.

Тріщинуватість

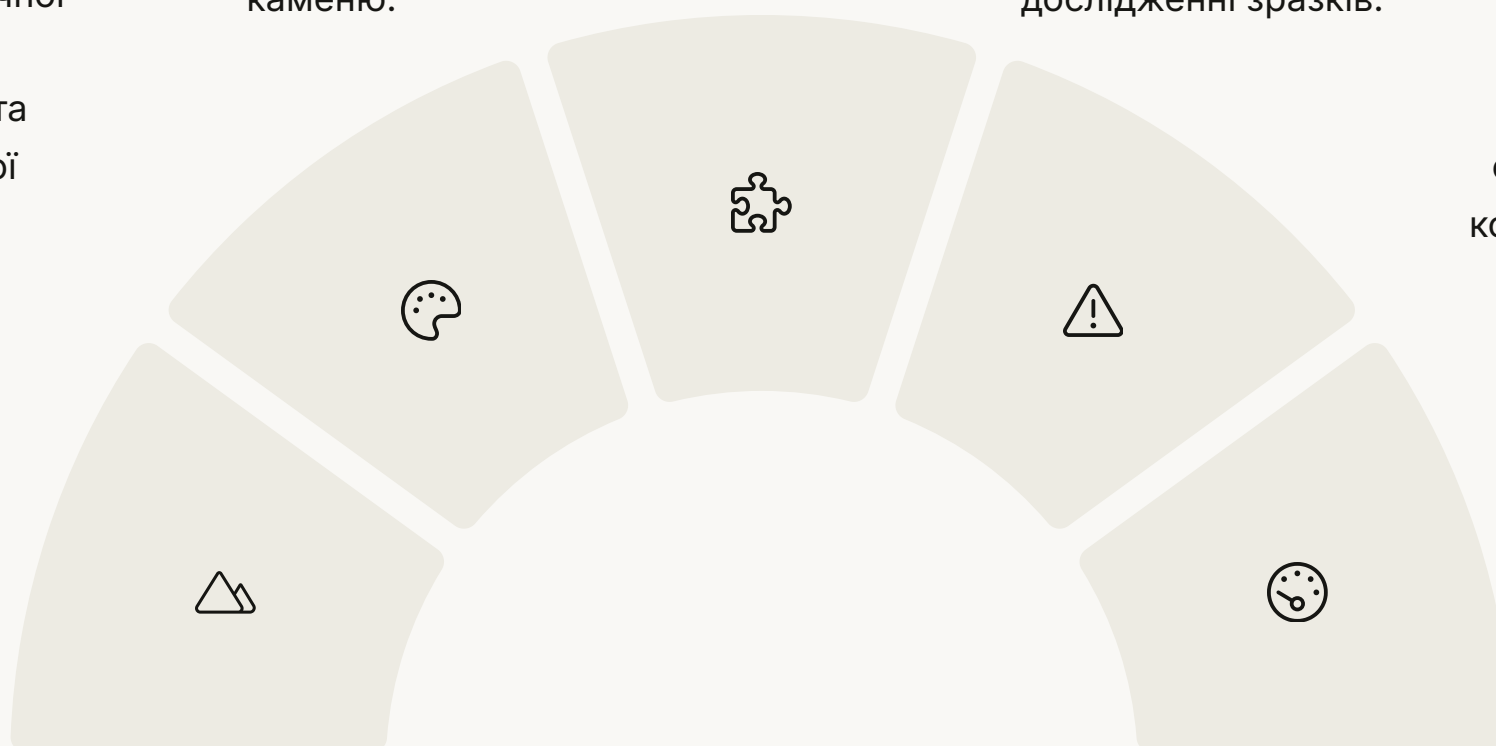
Характеризується азимутом простягання, кутом падіння, відстанню між тріщинами та ступенем їх заповнення. Для промислової розробки оптимальними є масиви з виходом блоків I-III категорій (об'ємом понад 0,4 м³) не менше 20-25% від загальної маси породи.

Наявність включень та дефектів

Ксеноліти, шліри, окварцювання, сульфіди (пірит), гематитизація та інші включення знижують якість блоків на 1-2 категорії. Критичними є пожилення, плями ржавіння, каверни та окремі мікротріщини, які виявляються при ультразвуковому дослідженні зразків.

Фізико-механічні властивості

Для кондиційного облицювального каменю нормуються: міцність на стиск (80-180 МПа), морозостійкість (не менше 50 циклів), водопоглинання (0,2-0,5% для граніту, до 2% для вапняку), стиранність (0,3-1,5 г/см²), що визначають за державними стандартами для кожного родовища.



Геометризація тріщинуватості облицювального каменю

Вивчення системи тріщин

- Виділення систем тріщин за азимутом простягання та кутом падіння (30-45°, 80-90°)
- Визначення відстаней між тріщинами (від 0,5 м до 5-6 м для гранітів)
- Оцінка характеру тріщин (відкриті з шириною до 5 см, закриті, заповнені кварцом чи глиною)
- Побудова стереограм тріщинуватості (діаграм Шмідта) для візуалізації просторової орієнтації систем

Створення карт тріщинуватості

- Карти інтенсивності тріщинуватості (масштаб 1:500 - 1:1000)
- Плани і розрізи з нанесенням основних систем тріщин у масштабі 1:200
- Карти блочності масиву з виділенням зон I, II та III категорій за розміром природних блоків

Ці карти дозволяють визначити зони з оптимальними умовами для видобутку блоків категорій I-IV та спрогнозувати вихід блоків об'ємом від 0,7 до 5-8 м³ відповідно до ДСТУ Б EN 1467:201х.

Прогноз виходу блоків облицювального каменю



Розрахунок коефіцієнта виходу блоків

$K_{\text{вих}} = V_{\text{бл}} / V_{\text{гірн}} \times 100\%$, зазвичай становить 15-45% для гранітів, 10-35% для мармурів та 20-50% для габро



Аналіз факторів впливу

Кількісна оцінка тріщинуватості (1-5 тр/м²), кути падіння систем тріщин (оптимально 75-90°), міцність на стиск (80-240 МПа), наявність мікротріщин та включень, вивітрюваність поверхні



Картування зон різної блочності

Створення 3D-моделей розподілу блочності за допомогою ГІС-технологій, виділення промислових категорій (I - >5 м³, II - 2-5 м³, III - 1-2 м³, IV - <1 м³)

Де $K_{\text{вих}}$ – коефіцієнт виходу блоків, $V_{\text{бл}}$ – об'єм придатних до використання блоків, $V_{\text{гірн}}$ – загальний об'єм гірничої маси. Для родовищ першої групи типовий вихід блоків становить 25-40%. Оптимізація технології видобутку на основі прогнозних карт може підвищити коефіцієнт виходу блоків на 10-15%, що суттєво впливає на рентабельність розробки родовища.

Геометризація декоративних властивостей облицювального каменю



Колориметричні характеристики

Спектрофотометричне вимірювання координат кольору в системі CIE L*a*b*, кількісна оцінка однорідності з коефіцієнтом варіації <math>< 15\%</math>, побудова ізоліній кольорової насиченості з кроком 5 одиниць для планування селективного видобутку.



Текстурні особливості

Кількісна характеристика малюнка за допомогою коефіцієнтів анізотропії (0,4-0,8), фрактальний аналіз структури ($D=1,2-1,7$), картування розмірів мінеральних зерен від <math>< 1\text{ мм}</math> (дрібнозернисті) до $> 5\text{ мм}$ (крупнозернисті) з виділенням зон преміум-якості.



Включення та дефекти

3D-візуалізація зон із ксенолітами діаметром >2 см, картування тріщинуватості з класифікацією за розкриттям (волосяні <math>< 0,5\text{ мм}</math>, середні 0,5-2 мм, великі >2 мм), геостатистичний аналіз розподілу прожилків з прогнозом якості блоків.

Комплексна геометризація декоративних властивостей дозволяє створити цифрову модель родовища з районуванням за сортністю, що збільшує коефіцієнт виходу блоків на 12-18% та оптимізує технологічні процеси видобутку.



Специфіка вугільних родовищ



Пластове залягання

Вугільні пласти Донбасу мають потужність від 0,6 до 2,5 м та площу поширення до 150-200 км². Коефіцієнт витриманості потужності становить 0,85-0,95, що дозволяє застосовувати комплексну методику розвідки з сіткою свердловин 250-500 м.



Тектонічна порушеність

У Львівсько-Волинському басейні виявлено понад 120 розривних порушень з амплітудою зміщення від 5 до 300 м. Складки характеризуються кутами падіння 15-40°, що вимагає тривимірного моделювання та детальної геометризації з кроком не більше 50 м.



Зміна якісних показників

Зольність вугілля Дніпровського басейну коливається від 10% до 45% на відстані лише 800 м, а вміст сірки – від 1,5% до 5,2%. Теплотворна здатність змінюється від 18,5 до 29,8 МДж/кг, що потребує побудови ізоліній якісних показників з кроком 2-5% для оптимізації процесу збагачення.



Газоносність

У шахтах категорії надкатегорійних за метаном концентрація CH₄ досягає 13-25 м³/т сухої маси. Геометризація газового режиму вимагає побудови карт ізогаз з кроком 5 м³/т для впровадження дегазації випереджаючими свердловинами довжиною 150-250 м з кроком буріння 25-35 м.

Геометризація форми і умов залягання вугільних пластів

Гіпсометричні плани

- Плани ізогіпс покрівлі та підосви пласта (масштаб 1:1000 - 1:5000)
- Плани кутів падіння пласта (з градацією 5-10°)
- Плани простягання пласта з векторами напрямку

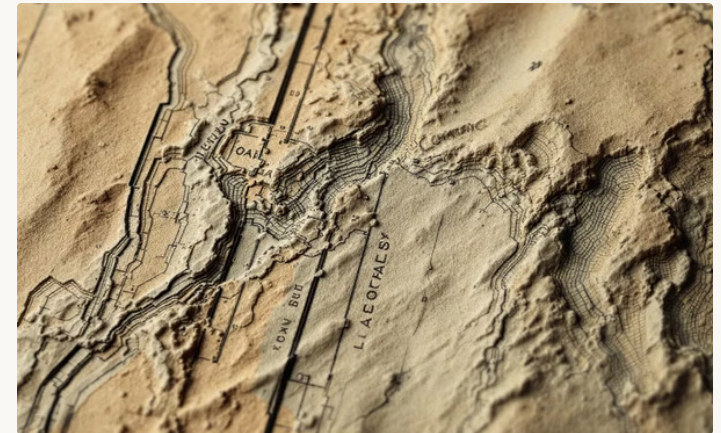
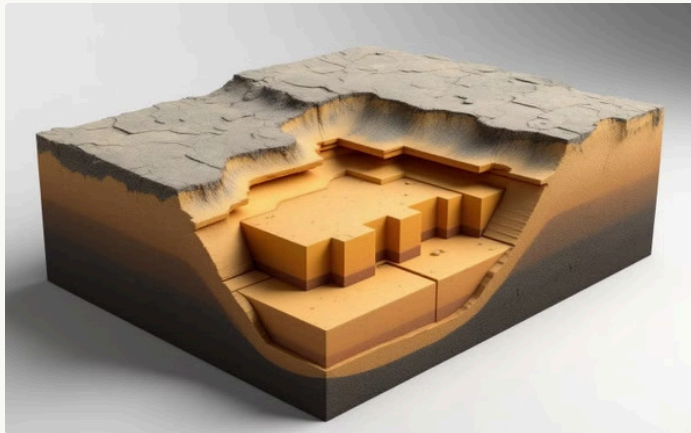
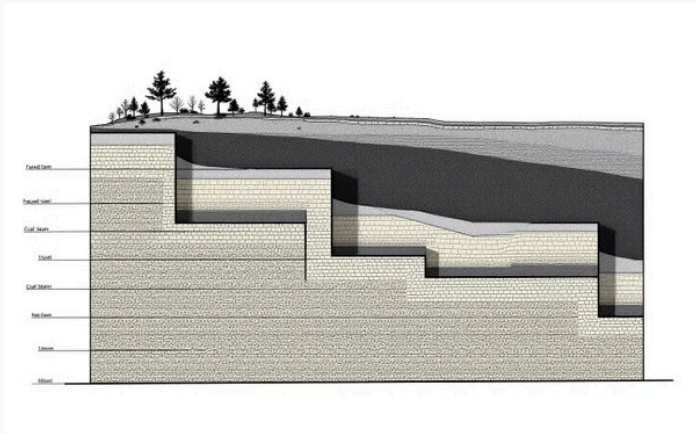
Ці плани дозволяють визначити просторове положення вугільного пласта з точністю до $\pm 0,5$ м по вертикалі та спланувати оптимальну схему його розкриття штреками та підготовки очисних вибоїв, особливо в умовах пластового залягання.

Геометризація потужності пласта

- Плани ізопотужностей пласта з кроком 0,1-0,2 м
- Плани ізопотужностей прошарків породи в пласті (понад 0,05 м)
- Карті мінливості потужності з виділенням зон розмиву та роздуву

Дані про потужність пласта необхідні для вибору механізованих комплексів (при $m = 0,8-2,5$ м), розрахунку промислових запасів вугілля та прогнозування зон підвищеної тріщинуватості, де потужність змінюється на понад 30% на 100 м простягання.

Геометризація тектонічних порушень вугільних пластів



Геометризація тектонічних порушень вугільних пластів включає комплекс спеціалізованих картографічних матеріалів:

Плани тектонічних порушень

Відображення розривних порушень з деталізацією елементів залягання скидів, насувів та підкидів з точністю до градуса. Містять дані про кути падіння змішувачів та азимуту простягання ліній перетину.

Карти амплітуд зміщення

Показують вертикальні та горизонтальні складові амплітуд зміщення по розривних порушеннях. Використовуються ізолінії амплітуд з кроком 5-10 м для великих порушень та 1-2 м для дрібних.

Зони підвищеної тріщинуватості

Виділення зон впливу тектонічних порушень з підвищеною тріщинуватістю вугілля та бічних порід. Картування зон з різним ступенем тріщинуватості (слабка, середня, інтенсивна).

Ця геометрична інформація дозволяє прогнозувати ускладнення при проведенні гірничих виробок та видобутку вугілля, планувати заходи щодо їх подолання, а також оцінювати стійкість покрівлі та ризики раптових викидів вугілля і газу в зонах тектонічних порушень.

Геометризація якісних показників вугілля

Зольність

Плани ізоліній зольності (A_d) в діапазоні 5-45%, що дозволяють виділити зони підвищеної зольності для селективного видобутку. Точність прогнозу зольності досягає $\pm 2\%$ при щільності розвідувальної мережі 250×250 м.

Теплотворна здатність

Плани теплотворної здатності (Q_{sdaf}) в діапазоні 20-36 МДж/кг у зв'язку з марочним складом вугілля. Виділяються зони енергетичного (Д, Г) та коксівного (Ж, К, ОС) вугілля з оптимальними показниками спікливості та коксівності.



Вміст сірки

Плани ізоліній вмісту загальної сірки (St) з градацією 0,5-4,0%, карти розподілу різних форм сірки (піритної, сульфатної, органічної). Підвищений вміст сірки ($>2,5\%$) вимагає спеціальних технологій збагачення.

Вологість

Плани ізоліній робочої вологості (W_{tr}) в межах 5-15% та максимальної вологості (W_{max}). Встановлюється чіткий зв'язок з гідрогеологічними умовами, особливо в зонах тектонічних порушень із підвищеною обводненістю.

Геометризація газоносності вугільних пластів

Плани ізоліній природної газоносності

Відображають кількість метану в діапазоні від 5 до 25 м³/т сухої беззольної маси вугілля. Будуються за даними випробування керну свердловин та шахтних проб з кроком ізоліній 5 м³/т, що дозволяє прогнозувати зони підвищеного газовиділення при проходці.

Плани зон метанових і вуглекислотних загазувань

Виділяють ділянки з концентрацією CH₄ понад 1% та CO₂ понад 0,5%, що створюють ризик раптових викидів газу. Прив'язуються до тектонічних порушень та зон підвищеного гірничого тиску, вимагаючи буріння випереджаючих дегазаційних свердловин довжиною 15-30 м.

Карти категорій за метановиділенням

Класифікують ділянки за п'ятибальною шкалою небезпеки (від I до V категорії), де V категорія відповідає виділенню понад 15 м³ CH₄ на тону видобутого вугілля. Визначають необхідну потужність вентиляційних установок (від 1500 до 4500 м³/хв) та схеми дегазації пластів-супутників.



Тривимірне моделювання вугільних родовищ



Структурне моделювання вугільних пластів

Створення цифрових моделей у програмних комплексах Micromine та Surpac з точністю до 0,5 м, що відображають геометрію пластів, кути падіння (5-45°), потужність (0,8-2,5 м) та дозволяють оптимізувати розташування стволів і підготовчих виробок, зменшуючи капітальні витрати на 15-20%.



Моделювання якісних показників

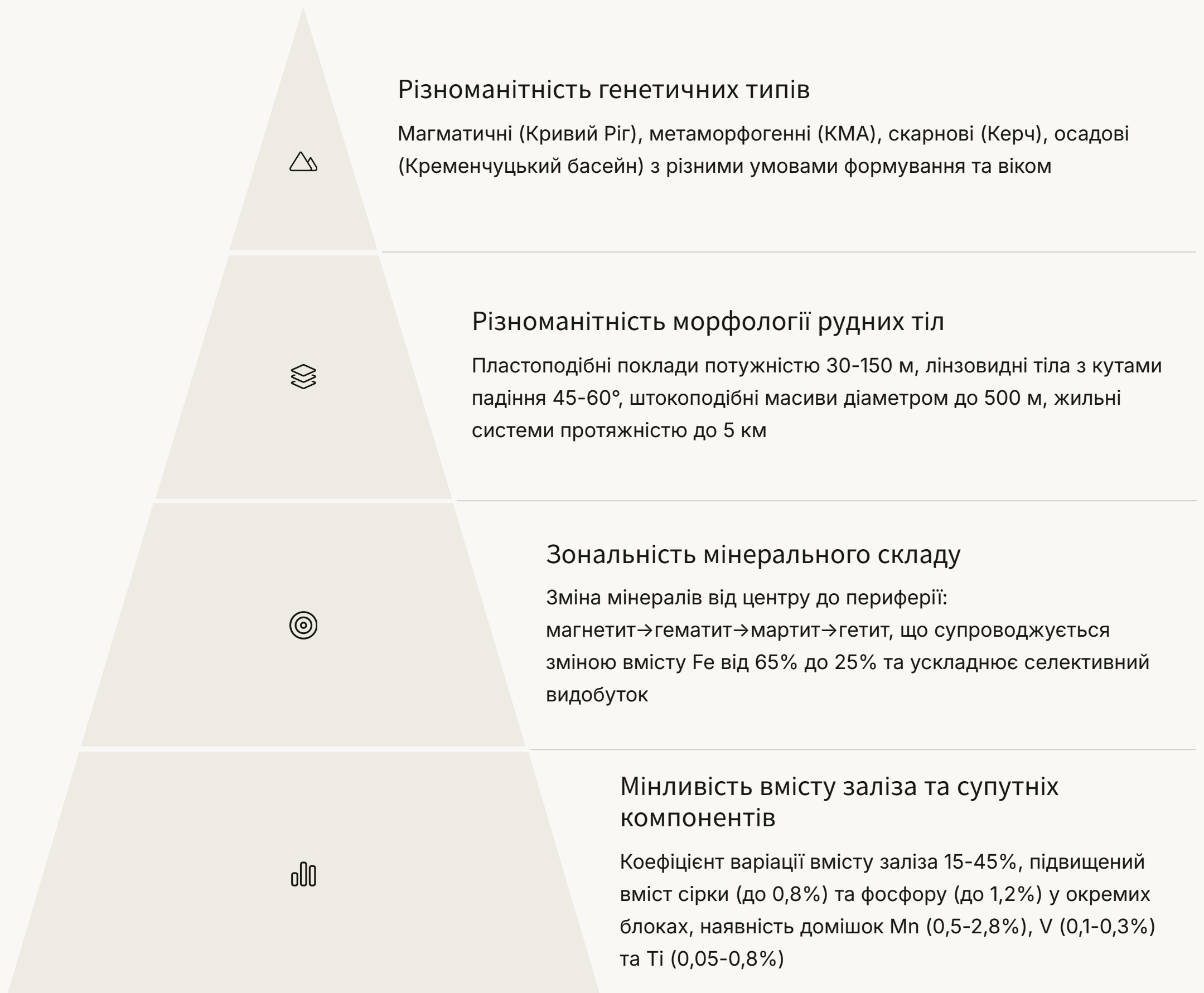
Застосування крігінгу та методу обернених відстаней для інтерполяції показників якості вугілля: зольності (8-40%), вмісту сірки (0,5-3,5%), теплотворної здатності (18-30 МДж/кг) та вологості (2-12%). Це дозволяє формувати видобувні ділянки з однорідною якістю сировини та планувати шихтування для забезпечення вимог споживачів.



Моделювання тектонічних порушень

Візуалізація скидів з амплітудами від 0,5 до 30 м, насувів, складок та флексур з використанням даних геофізичних досліджень та випереджаючого буріння. Прогнозування зон підвищеного гірничого тиску та водопритоків (до 50-200 м³/год), що зменшує аварійність на 30% та запобігає незапланованим простоям лав.

Специфіка залізорудних родовищ



Ці особливості суттєво впливають на вибір системи розробки, технологію збагачення та комплексне використання залізних руд.

Геометризація форми і умов залягання залізорудних тіл



Геометризація контактів рудних тіл

Плани ізогіпс покрівлі та підосви з кроком 5-10 м, карти потужності рудних тіл масштабу 1:1000-1:2000, просторові моделі контактів з відображенням азимутів і кутів падіння

2

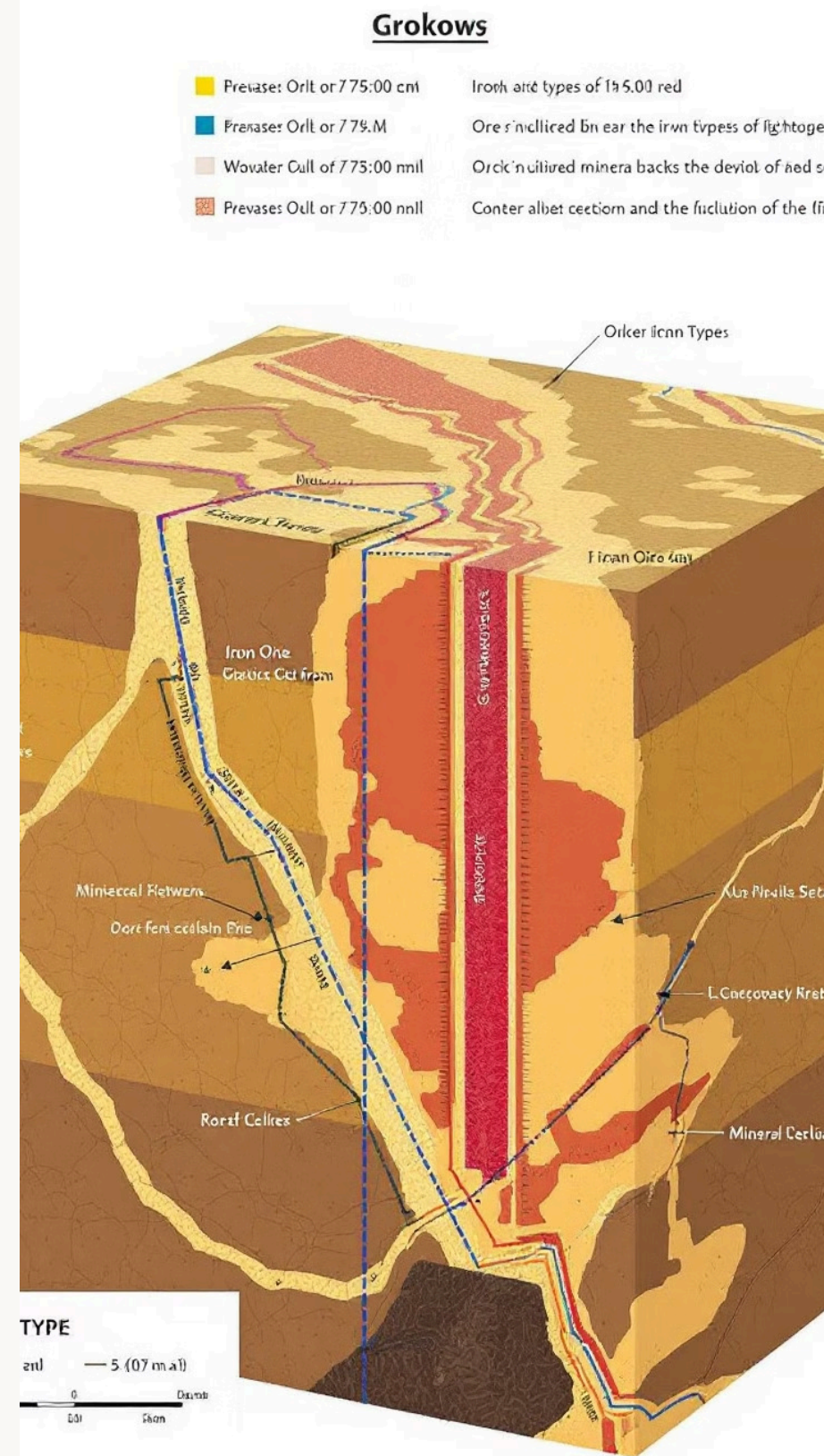
Геометризація внутрішньої будови

Виділення природних типів руд (багаті, бідні, окислені, магнетитові), картування мінералогічних різновидів за вмістом гематиту, мартиту, сидериту та інших мінералів, тривимірне моделювання зон окислення



Геометризація тектонічних особливостей

Плани розривних порушень з класифікацією за амплітудою (малоамплітудні 5-20 м, середньоамплітудні 20-100 м), карти тріщинуватості з розами-діаграмами, плани складчастих деформацій з виділенням ядер і крил антикліналей та синкліналей



Геометризація якісних показників залізних руд

Геометризація вмісту заліза

- Плани ізоліній загального заліза (Feзаг) з інтервалом 2-5% для родовищ магнетитових кварцитів
- Плани ізоліній магнетитового заліза (Feмагн) з кроком 3% для оперативного планування видобутку
- Карти співвідношення Feмагн/Feзаг для оцінки ефективності магнітної сепарації

Ці плани дозволяють виділити промислові сорти руди (багаті Fe>46%, середні Fe=30-46%, бідні Fe=20-30%) та спланувати селективний видобуток з урахуванням вимог металургійного виробництва.

Геометризація шкідливих домішок

- Плани ізоліній вмісту сірки з пороговими значеннями 0,1%, 0,3% та 0,5% згідно промислових стандартів
- Плани ізоліній вмісту фосфору з градацією <0,07%, 0,07-0,2% та >0,2% для коригування технології доменної плавки
- Детальні карти розподілу миш'яку (допустимий вміст <0,05%), цинку та свинцю з використанням даних рентгенофлуоресцентного аналізу

Геометризація шкідливих домішок дозволяє контролювати їх вміст у товарній продукції, уникати штрафних санкцій при поставках концентрату та оптимізувати процеси збагачення для їх видалення.

Геометризація технологічних властивостей залізних руд



Карти збагачуваності руд

Відображають здатність руди до збагачення магнітною сепарацією, флотацією та гравітаційними методами. Дозволяють прогнозувати вихід концентрату (65-68% Fe) та ступінь вилучення заліза (92-96%) для кожної технологічної ділянки родовища.



Плани міцності та твердості

Характеризують фізико-механічні властивості руд за шкалою Протодьяконова ($f = 6-14$) та твердість за Моосом (5-6,5). Ці параметри визначають енергоємність буріння, вибір вибухових речовин та режими дроблення і подрібнення руди.



Карти текстурно-структурних особливостей

Показують розмір зерен магнетиту (0,01-0,5 мм), характер зрощення з кварцом, амфіболами та силікатами. Виділяють зони з масивною, смугастою, вкрапленою та плейчастою текстурами, що вимагають різних схем подрібнення (одно-, дво- або тристадійних).

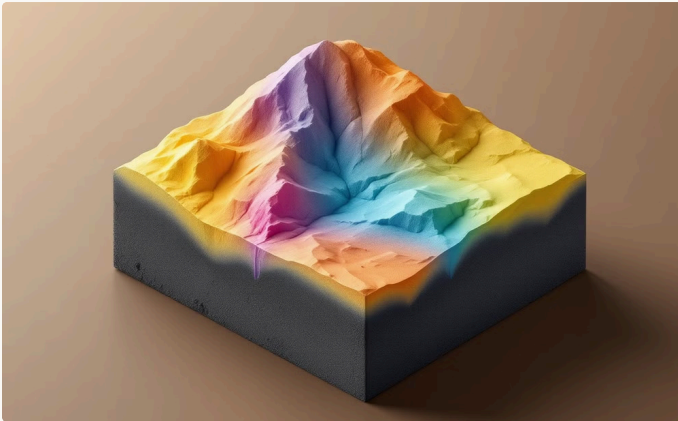


Карти мінерального складу

Відображають кількісне співвідношення магнетиту (25-65%), гематиту (5-20%), мартиту (2-15%) та гідроксидів заліза. На картах виділяються зони окислення з глибиною поширення 50-150 м, що потребують спеціальних технологій збагачення.

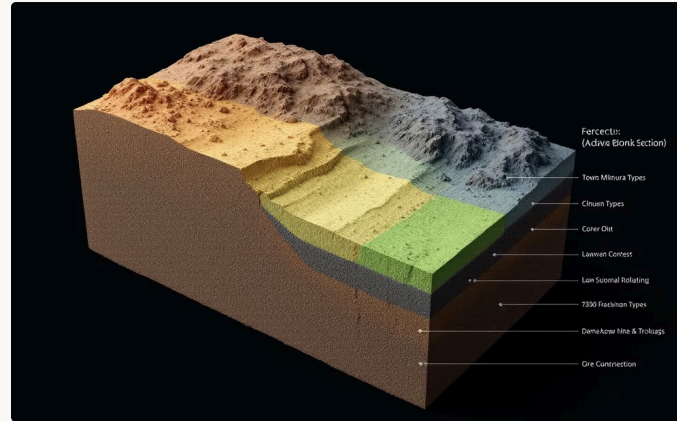


Блокове моделювання залізорудних родовищ



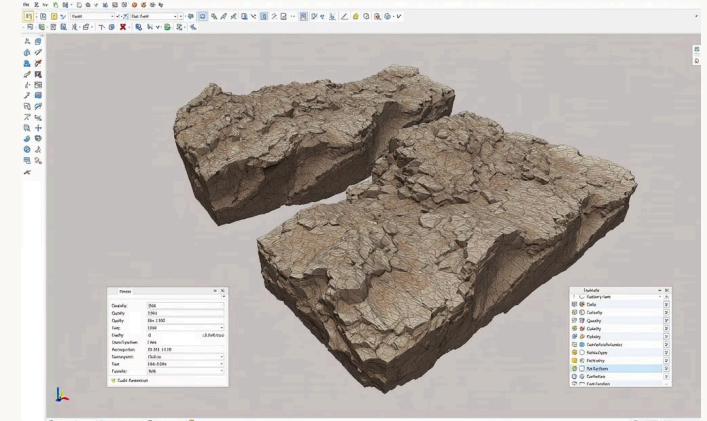
Виділення експлуатаційних блоків

Поділ родовища на блоки розміром 10×10×10 м з використанням геостатистичних методів (кригінг, IDW). Врахування тектонічних порушень та літологічних меж для точного оконтурення рудних тіл за бортовим вмістом заліза 20%.




Підрахунок запасів у блоках

Визначення кількості руди та металу в кожному блоці з використанням програмних комплексів Datamine та Micromine. Розрахунок об'ємної маси (3,2-4,5 т/м³) на основі мінерального складу та пористості, з коригуванням за даними свердловинної гамма-гамма каротажу.



Прогноз якості руди в блоках

Інтерполяція вмісту загального заліза (Fe_{заг} 22-67%), магнетитового заліза (Fe_{магн} 15-32%), шкідливих домішок (S<0,15%, P<0,08%) та показників дробимості за шкалою Протодьяконова (f=6-14) для оптимізації процесів усереднення та шихтування руди.



Особливості геометризації різних типів залізородних родовищ

Геометризація родовищ залізистих кварцитів

Геометризація шаруватості з кутами падіння 45-70°, картування зон мартитизації магнетиту (коефіцієнт окислення 0,2-0,8), виділення первинних та окислених руд. Характерна витримана потужність пластів (50-150 м) і значна протяжність рудних тіл (до 5-7 км по простяганню).

Геометризація скарнових родовищ

Картування контактних зон скарнування між вапняками та інтрузивними тілами, виділення метасоматичних ореолів (потужністю 5-30 м), геометризація зональності від гранатових до піроксенових різновидів. Складна лінзо- та гніздоподібна морфологія рудних тіл з коефіцієнтом варіації вмісту заліза 35-50%.

Геометризація осадових родовищ

Виділення літоральних та субліторальних фаціальних зон, картування продуктивних горизонтів потужністю 3-15 м, геометризація оолітових структур з вмістом заліза 30-45%. Характерна пологозалягаюча пластова форма (кути падіння 5-15°) та латеральна зональність зміни якості руди з коефіцієнтом варіації 15-25%.

Специфіка родовищ кольорових металів

Різноманітність генетичних типів

Гідротермальні родовища (Майкаїн, температура формування 150-350°C), скарнові (Тур'їнські родовища, асоціація з вапняками), порфірові (Коунрад, вміст Cu 0,3-0,6%), колчеданні (Гайське родовище, вміст Zn до 4%), кожен з особливою парагенетичною асоціацією мінералів.

Зональність зруденіння

Вертикальна зональність з амплітудою 300-800 м (Cu→Zn→Pb→Ag), латеральна зональність з радіусом ореолів 50-200 м та коефіцієнтом зональності 1,3-2,5, метасоматичні колонки від пропілітів до вторинних кварцитів.



Складна морфологія рудних тіл

Жили (середня потужність 0,5-3 м з кутом падіння 45-80°), штокверки (щільність прожилків 10-15 на 1 м²), лінзи (довжина по простяганню до 150 м), трубоподібні тіла з коефіцієнтом рудоносності 0,7-0,9 та складними апофізами.

Нерівномірний розподіл компонентів

Наявність бананців з концентрацією Au до 100-150 г/т, рудних стовпів (коефіцієнт варіації вмісту Cu 120-180%) з контрастністю аномалій 5-10, зон вторинного збагачення з коефіцієнтом збагачення 1,5-3.

Комплексний склад руд

Присутність Cu-Mo-Au асоціацій у порфірових родовищах, Pb-Zn-Ag у гідротермальних (співвідношення Pb:Zn = 1:0,8), Ni-Co-Cu у сульфідних, а також супутніх Re, Se, Te, In (0,001-0,01%) та Cd (0,05-0,1%), що вимагає багатоконпонентної геометризації.

Геометризація рудних тіл кольорових металів

Геометризація жильних тіл

- Побудова планів ізопотужностей жил з кроком 0,1-0,5 м для виявлення зон роздувів
- Картування елементів залягання жил (азимутів простягання і кутів падіння) на стереографічних проекціях
- Виділення рудних стовпів за бортовим вмістом $Cu \geq 0,5\%$, $Pb \geq 1,0\%$, $Zn \geq 1,5\%$

Жильні тіла характеризуються значною мінливістю потужності (коефіцієнт варіації 80-120%) та вмісту металів (коефіцієнт варіації 60-150%), що вимагає детальної геометризації з кроком опробування 2-5 м для виявлення закономірностей їх просторового розподілу та оптимізації видобутку.

Геометризація штокверкових зон

- Побудова планів інтенсивності прожилкування з виділенням класів 10-30, 30-60, >60 прожилків на 1 м²
- Виділення зон підвищеної концентрації прожилків за допомогою коефіцієнта об'ємного штокверкування ($K_{шт} \geq 0,02$)
- Картування напрямків прожилків з розрахунком коефіцієнта анізотропії та виділенням систем орієнтації

Штокверкові зони представляють собою об'ємні тіла з густою мережею прожилків, що містять зруденіння Cu - Mo , Cu - Au та поліметалічного складу. Їх геометризація на основі комбінованої мережі опробування 20×20×10 м дозволяє виділити ділянки з промисловими концентраціями металів для селективного видобутку та оптимізації процесів збагачення.

Геометризація якісних показників руд кольорових металів



Геометризація вмісту основних компонентів

Побудова планів ізоліній вмісту Cu (0,5-5%), Pb (1-10%), Zn (2-15%) та інших металів з кроком 0,5-1%. Розрахунок коефіцієнтів рудоносності ($K_p=0,3-0,8$) для виділення промислових контурів з бортовим вмістом міді $\geq 0,5\%$, свинцю $\geq 1\%$, цинку $\geq 2\%$.



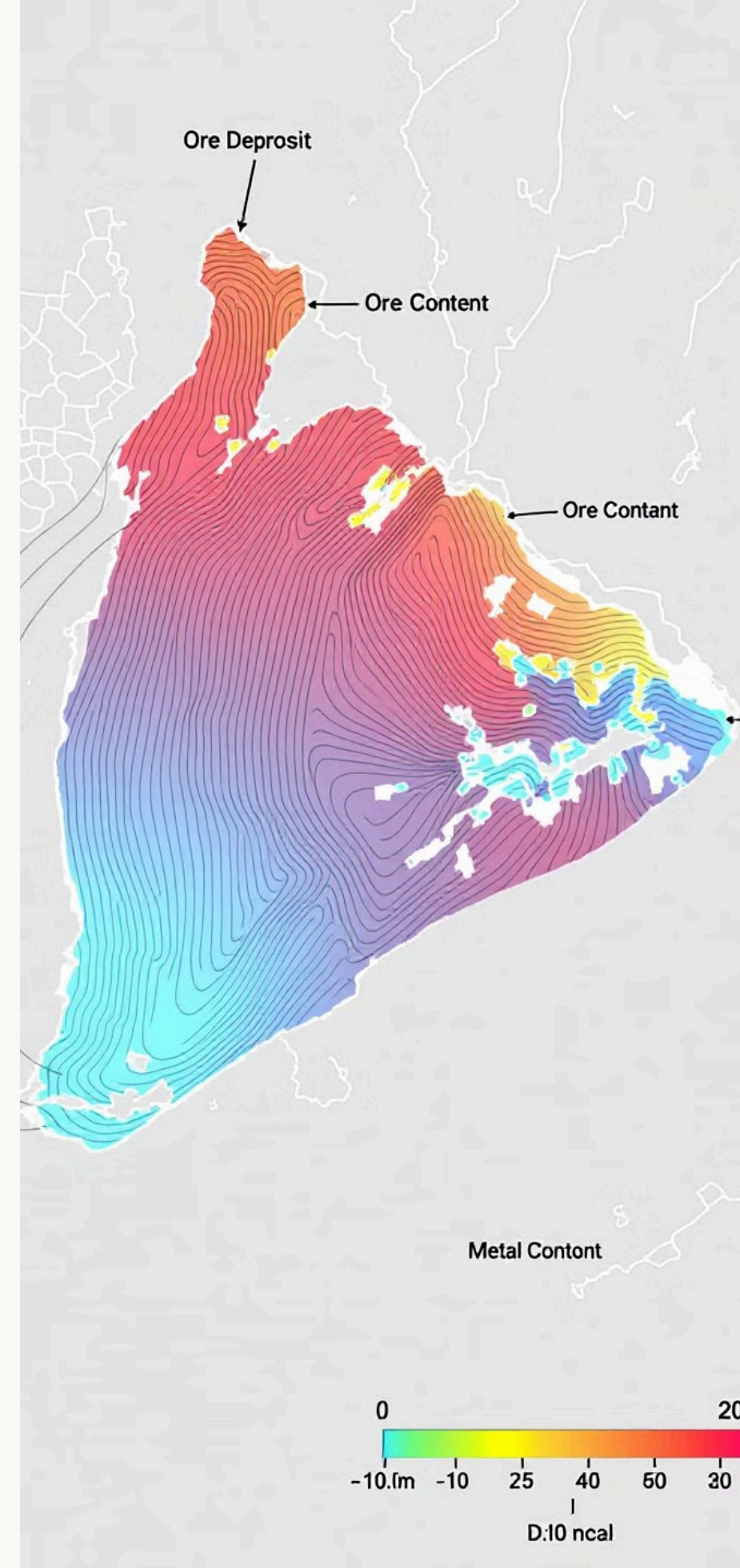
Геометризація вмісту супутніх компонентів

Розробка планів ізоліній Au (0,5-5 г/т) та Ag (5-50 г/т) з кроком 0,5 г/т і 5 г/т відповідно. Картування рідкісних елементів-супутників: Re (0,5-10 г/т), Se (10-100 г/т), Te (5-50 г/т). Виділення зон з промисловими концентраціями Cd (0,01-0,05%), In (50-200 г/т), Ga (20-50 г/т).

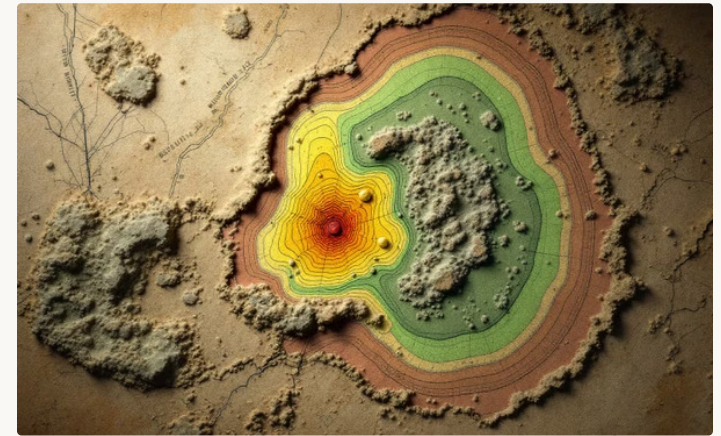
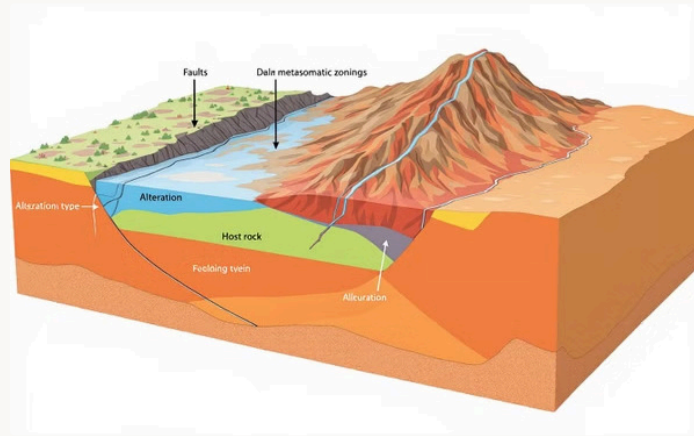


Геометризація мінерального складу

Створення карт мінеральних парагенезисів: халькопірит-борніт-халькозинового, галеніт-сфалеритового, пірит-арсенопіритового. Побудова планів співвідношення первинних (халькопірит:борніт = 3:1-1:2) та вторинних мінералів. Виділення зон окислення (до 50-100 м від поверхні) та вторинного сульфідного збагачення (80-150 м).



Геометризація гідротермально-метасоматичних змін



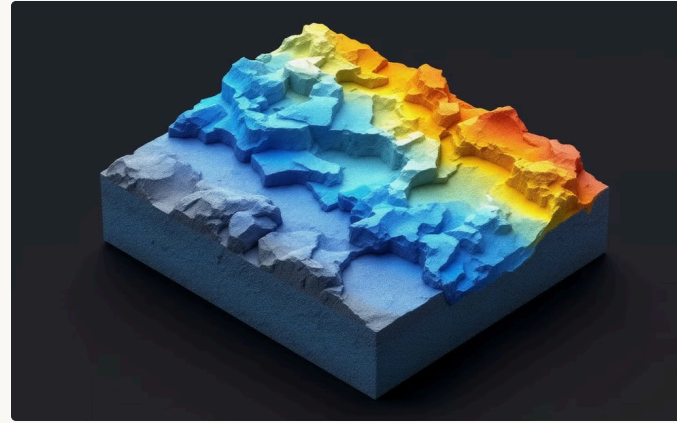
Геометризація гідротермально-метасоматичних змін включає: 1) детальне картування зон окварцювання з оцінкою інтенсивності процесу за співвідношенням кварц/первинні мінерали; 2) виділення ареалів серицитизації з визначенням ступеня заміщення польових шпатів та темноколірних мінералів; 3) документування зон хлоритизації з кількісною оцінкою перетворення біотиту та амфіболів у хлорит. Для родовищ міді, свинцю та цинку характерна концентрична зональність метасоматичних ореолів: внутрішня зона окварцювання та серицитизації (часто з сульфідною мінералізацією) → проміжна аргілітита зона → зовнішня пропілітита зона (хлорит-епідот-карбонатна). Геометризація цих зон дозволяє встановити векторність гідротермального процесу та прогнозувати положення рудних тіл з підвищеними концентраціями кольорових металів на флангах та глибоких горизонтах родовища.

Блочне моделювання родовищ кольорових металів



Створення каркасних моделей рудних тіл

Побудова тривимірних дротяних каркасів та твердотільних оболонок рудних тіл у програмному середовищі Micromine або Datamine на основі даних буріння, гірничих виробок та геофізичних досліджень. Застосування методів триангуляції Делоне для точного відображення морфології та внутрішньої структури рудних зон.



Інтерполяція вмістів компонентів у блоки

Розрахунок середніх вмістів Cu, Zn, Pb та інших металів у елементарних блоках розміром 5×5×5 м з використанням алгоритмів крігінгу, методу обернених відстаней (IDW) та анізотропного пошуку. Використання варіограмного аналізу для визначення параметрів просторової кореляції вмістів з урахуванням геологічної структури родовища.



Оптимізація контурів відпрацювання

Визначення економічно обґрунтованих меж видобутку за допомогою алгоритму Лерча-Гроссмана з урахуванням бортового вмісту металів (0.5-1.2%), кутів укосів бортів кар'єру (45-60°), коефіцієнтів вилучення при збагаченні (78-93%) та поточних цін на метали. Моделювання різних сценаріїв відпрацювання для оптимізації NPV проекту.

Специфіка золоторудних родовищ



Крайня нерівномірність розподілу золота

Коефіцієнт варіації вмістів сягає 150-300%, з наявністю "бонанців" де концентрації перевищують 50-100 г/т при середньому вмісті 2-5 г/т. Це вимагає застосування спеціальних методик опробування та застосування коефіцієнтів усікання при підрахунку запасів.

Різноманітність форм знаходження золота

Від крупного самородного (0,1-2,0 мм) з вилученням гравітаційними методами до субмікроскопічного (менше 0,001 мм) у сульфідах, що потребує ціанування або автоклавного вилуговування. У родовищах карлінського типу до 90% золота міститься у піриті та арсенопіриті.



Складна морфологія рудних тіл

Потужність рудних тіл варіює від перших сантиметрів до 5-10 м, коефіцієнт рудоносності мінералізованих зон становить 0,3-0,7. Характерне розгалуження жил на апофізи, утворення штокверків з об'ємною щільністю прожилків 10-30 шт/м³ при прожилково-вкрапленому зруденінні.



Струменева будова

Рудні стовпи займають 15-40% площі рудних тіл але містять 60-80% запасів золота. Азимут падіння струменів часто контролюється перетином рудоконтролюючих структур і зон підвищеної проникності, утворюючи "рудні перехрестя" з вмістом золота, що у 3-5 разів перевищує середній.



Геометризація умов залягання золоторудних тіл

Геометризація жильних і жильно-прожилкових зон

- Побудова планів та розрізів рудних зон із застосуванням методів геостатистики
- Картування елементів залягання з використанням стереографічних проекцій
- Виділення зон підвищеної продуктивності за допомогою індикаторного крігінгу

Жильні тіла часто мають складну морфологію з численними відгалуженнями, роздувами та пережимами, що змінюються на відстані 5-10 метрів. Їх простягання сягає сотень метрів при потужності 0,5-3 м, що вимагає детального геометричного моделювання з кроком опробування не більше 2-3 м для коректного планування видобутку.

Геометризація зон мінералізації

- Картування інтенсивності мінералізації за вмістом сульфідів (3-15%)
- Виділення структурно-літологічних пасток на контактах різних за компетентністю порід
- Геометризація зон дроблення і брекчіювання з виміром ступеня тріщинуватості (10-50 тріщин на погонний метр)

Зони мінералізації представляють собою об'ємні тіла потужністю від 5 до 25 м з нерівномірним розподілом золота (коефіцієнт варіації 120-180%), приуроченим до певних структурних елементів (флексурні перегини, поперечні розломи) та літологічних горизонтів (вуглецеві сланці, доломітизовані вапняки).

Особливості опробування та аналізу золоторудних родовищ

Ефект самородків

Наявність золотин розміром $>0,1$ мм призводить до завищення результатів аналізу на 30-40% та збільшення похибки оцінки запасів. Для нейтралізації ефекту застосовують металургійне опробування з відбором і обробкою проб масою 15-20 кг.

Вплив гравітаційного золота

Через високу густину ($19,3$ г/см³) під час пробопідготовки відбувається сегрегація часток золота. Для боротьби з цим використовують квартування за методом "конверта", застосування флокулянтів та гомогенізацію проб у планетарних млинах протягом 8-10 хвилин.

Методи боротьби з нерівномірністю

Для родовищ з коефіцієнтом варіації $>100\%$ відбирають серії проб по сітці 2×2 м, застосовують пробірний аналіз з доважкою срібла (900°) та використовують методи статистичної обробки з видаленням аномальних значень за критерієм Шовене.



Методи геометризації вмістів золота

Традиційні методи побудови ізоліній

Інтерполяція вмістів золота з використанням поліноміальних функцій 2-3 ступеня та методу обернених відстаней (IDW) з показником степеня 2-3. Побудова ізоліній з кроком 0,5-1,0 г/т для детальної оцінки просторового розподілу золота.

Індикаторний крігінг

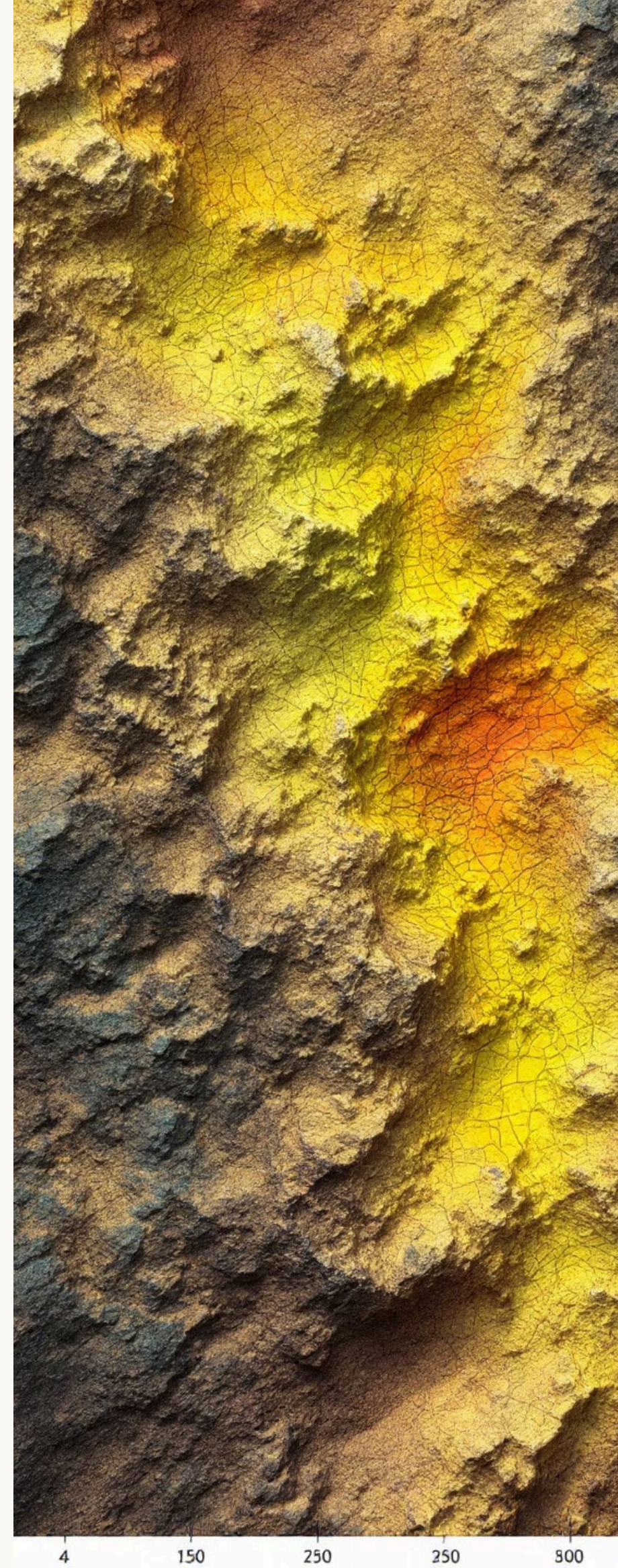
Визначення ймовірності перевищення бортового вмісту золота (зазвичай 0,5-2,0 г/т) з використанням індикаторних варіограм радіусом пошуку 25-50 м. Дозволяє створити 3D-модель рудного тіла з оцінкою невизначеності на кожному блоці розміром 5×5×5 м.

Метод граничного вмісту

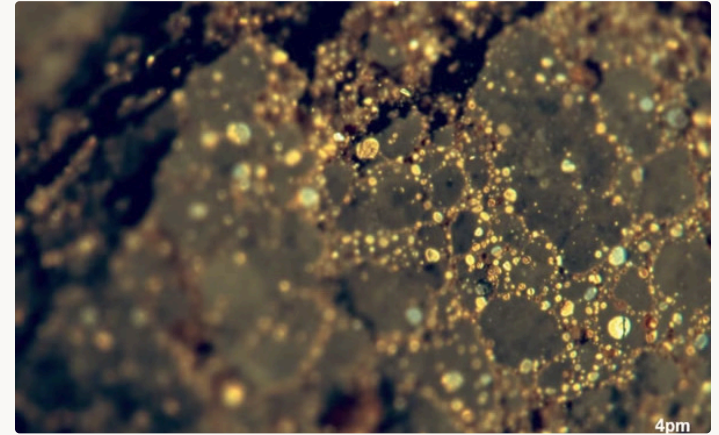
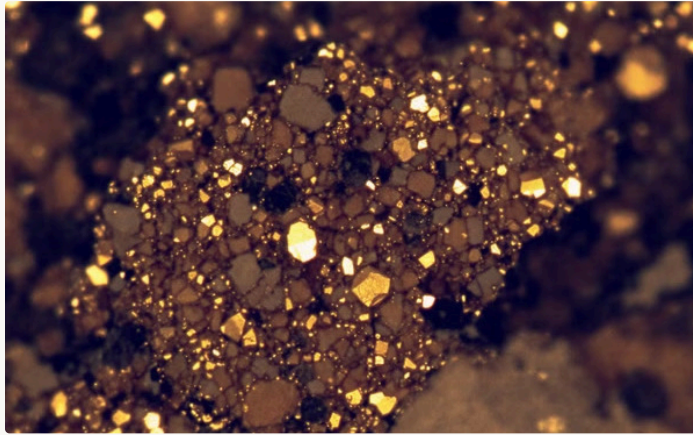
Побудова серії контурів з бортовими вмістами 0,5; 1,0; 2,0 та 5,0 г/т для визначення промислових (>2 г/т) та технологічних (0,5-2,0 г/т) типів руд. Оптимізація контурів з урахуванням мінімальної потужності рудного тіла (1,5-2,0 м) та максимальної потужності прошарків пустих порід (1,0 м).

Логнормальний крігінг

Застосування логарифмічного перетворення даних через коефіцієнт варіації вмістів золота >120%. Побудова відповідних варіограм з виявленням анізотропії (зазвичай 1:2:3 для вертикального, поперечного та поздовжнього напрямків) та використанням експоненціальної моделі з ефектом самородків 20-30%.

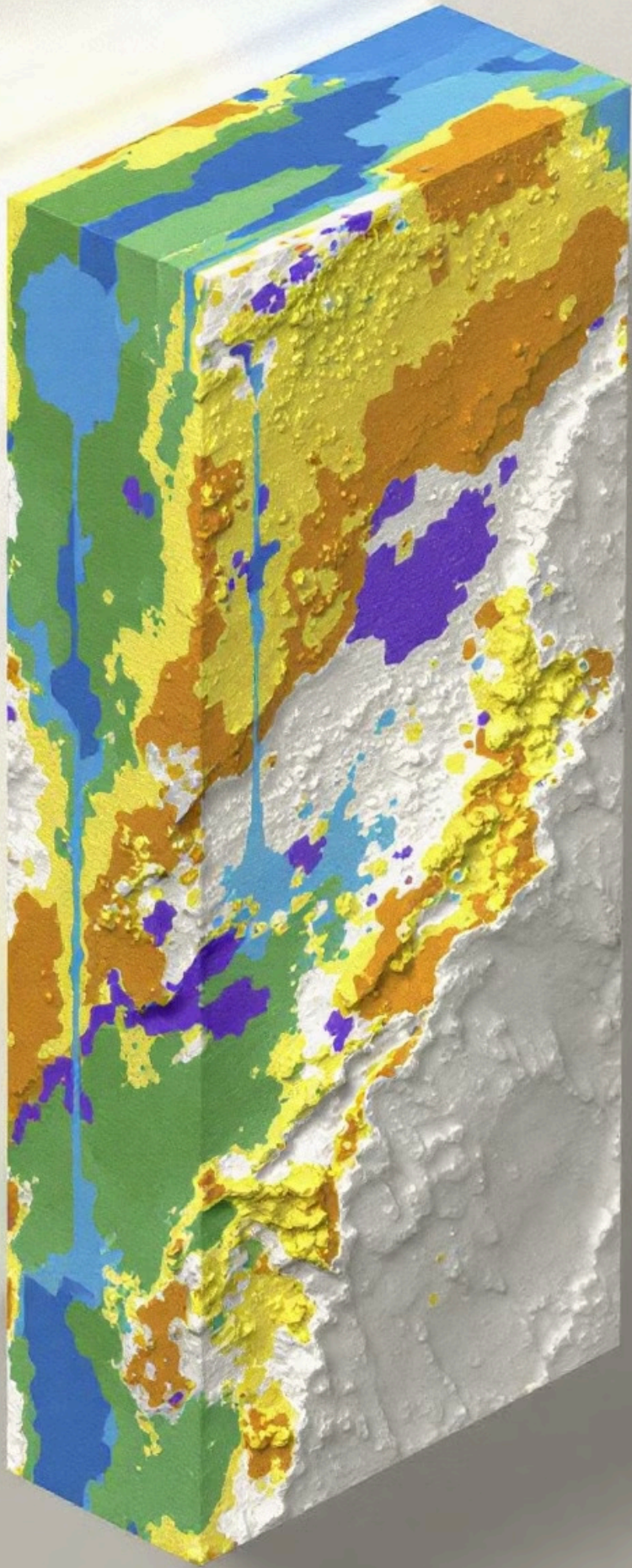


Геометризація форм знаходження золота



Геометризація форм знаходження золота передбачає детальне просторове картування різних типів мінералізації: самородного золота в кварцових жилах (розміром 0,05-2 мм), тонкодисперсного золота в сульфідах (менше 0,01 мм) та зв'язаного золота в арсенопіриті та піриті. Процес включає побудову планів і розрізів із зазначенням коефіцієнтів вільного і зв'язаного золота (Квз) для кожного геологічного блоку, а також створення карт гранулометричного складу золотин із виділенням зон за середнім розміром частинок (<0,1 мм, 0,1-0,25 мм, >0,25 мм). Ці параметри визначають вибір технології збагачення (гравітаційна, флотаційна, ціанування) та дозволяють прогнозувати коефіцієнт вилучення золота з точністю до 5-8%.

Особливості блочного моделювання золоторудних родовищ



Врахування ефекту самородків

Застосування методів крігінгу індикаторів та множинного крігінгу з обмеженням максимального вмісту (top-cut) до 25-30 г/т для мінімізації впливу аномально високих вмістів золота. Використання варіографії з моделями сферичного типу для виявлення просторової анізотропії.



Застосування методів умовних симуляцій

Створення 50-100 рівноймовірних моделей розподілу золота за допомогою методів SGS (Sequential Gaussian Simulation) та SGSIM для оцінки невизначеності запасів з довірчим інтервалом 90%. Важливо враховувати геологічні домени з різною щільністю опробування.

Оцінка невизначеності геологічної моделі

Розрахунок коефіцієнтів варіації (CV) у діапазоні 0,2-0,8 для різних блоків моделі та визначення категорій запасів згідно кодексу JORC. Застосування E-типових оцінок та р-процентилів (p10, p50, p90) для кількісної оцінки ризиків при відхиленні від середнього на 15-30%.



Обґрунтування бортового вмісту

Визначення оптимального бортового вмісту золота в діапазоні 0,5-1,2 г/т з використанням NPV-оптимізатора та врахуванням вартості видобутку (40-60 USD/т), вартості переробки (25-35 USD/т) та коефіцієнта вилучення золота (85-92%) для максимізації прибутку.



Геоінформаційні системи в геометризації родовищ



Створення баз даних геологорозвідувальної інформації

Інтеграція даних буріння (координати, глибина, азимут, кут нахилу), результатів хімічного та мінералогічного аналізу проб, геофізичних досліджень свердловин (каротаж, магнітометрія) у єдину структуровану систему для золоторудних родовищ.



Тривимірне моделювання геологічних об'єктів

Створення детальних каркасних моделей рудних тіл з урахуванням структурних особливостей (розломів, складок), літологічних контактів та зон окислення для оптимізації процесу блочного моделювання родовищ золота та визначення контурів рудних зон.



Просторовий аналіз даних

Застосування методів просторової статистики для виявлення трендів розподілу вмістів золота, визначення зон збагачення та збіднення руди, прогнозування якості руди у невивчених ділянках родовища з використанням варіограмного аналізу та різних методів крігінгу.

Геостатистичні методи в геометризації родовищ

Варіограмний аналіз

- Дослідження просторової кореляції даних на відстанях від 10 до 500 метрів
- Виявлення анізотропії родовища в горизонтальному та вертикальному напрямках
- Визначення оптимальних параметрів інтерполяції для різних типів мінералізації

Варіограмний аналіз дозволяє кількісно оцінити просторову мінливість параметрів родовища та визначити напрямки максимальної та мінімальної мінливості. Для золоторудних родовищ характерна висока варіабельність на коротких відстанях, тоді як для родовищ вугілля спостерігається більш плавна зміна показників.

Методи інтерполяції

- Ординарний крігінг — оптимальний для родовищ з однорідною мінералізацією
- Індикаторний крігінг — ефективний для оконтурювання рудних тіл за бортовим вмістом
- Універсальний крігінг — враховує глобальні тренди розподілу корисного компонента
- Диз'юнктивний крігінг — застосовується при наявності різких контактів між різними типами порід

Крігінг є оптимальним методом інтерполяції, який мінімізує похибку оцінки та дозволяє визначити її достовірність у кожній точці родовища. При використанні крігінгу для родовищ кольорових металів точність оцінки запасів підвищується на 15-20% порівняно з традиційними методами.

Стохастичне моделювання родовищ

Послідовне гауссівське моделювання (SGS)

Алгоритм генерує реалізації на основі варіограмних моделей з використанням методу простого крігінгу. Забезпечує точне відтворення гістограми вихідних даних і просторової структури з дисперсією похибки $\pm 10-15\%$. Оптимальний для моделювання безперервних змінних (вміст металу, пористість).

Послідовне індикаторне моделювання (SIS)

Використовує набір індикаторних варіограм для різних порогових значень, перетворюючи неперервні змінні в бінарні (0/1). Ефективний при моделюванні родовищ зі складною літологією (наприклад, золоторудні родовища Українського щита) та при обмеженій кількості свердловинних даних.

Плюригауссівське моделювання (PGS)

Базується на трансформації декількох незалежних гауссівських полів через порогові функції. Дозволяє моделювати складні контакти між літологічними типами з урахуванням їх взаємовідносин. Успішно застосовується для відтворення складних карбонатних структур нафтогазових родовищ Дніпровсько-Донецької западини.

Оцінка невизначеності моделей

Включає створення 100-200 реалізацій для розрахунку E-типових оцінок і довірчих інтервалів. Дозволяє кількісно оцінити ризики недосягнення планових показників видобутку (P10, P50, P90) та оптимізувати розкрійні плани з урахуванням 25-30% мінливості вмісту корисного компонента.



Дистанційні методи в геометризації родовищ



Аерофотозйомка і космічні знімки

Багатоспектральна та гіперспектральна зйомка дозволяє ідентифікувати мінеральний склад поверхні родовища на основі спектральних характеристик з роздільною здатністю до 30 см. Особливо ефективна для виявлення зон окварцювання та залізистих зон окислення.



Лідарне сканування

Забезпечує створення хмари точок з щільністю до 100 точок на м², що дозволяє виміряти елементи залягання геологічних структур з точністю $\pm 2^\circ$. Використовується для моніторингу стійкості бортів кар'єрів та виявлення зон тріщинуватості зі зміщеннями від 5 мм.



Безпілотні літальні апарати

Оснащені мультисенсорними системами БПЛА забезпечують щоденний моніторинг обсягів видобутку з точністю до 97%, автоматизовану зйомку вибоїв у небезпечних зонах та мультиспектральний аналіз в режимі реального часу для оперативного коригування плану гірничих робіт.

Інтеграція даних різної природи

Комплексування геологічних і геофізичних даних

Зіставлення керну свердловин з результатами електророзвідки, гравірозвідки та магніторозвідки для підвищення достовірності інтерпретації на 40-60% та скорочення необхідного обсягу буріння

Багатомірний аналіз геологічних даних

Використання методів машинного навчання та кластерного аналізу для обробки понад 20 параметрів одночасно, що підвищує ефективність прогнозування промислового зруденіння на 25-30%



Використання геохімічних ореолів

Застосування мультиелементного аналізу (Cu, Pb, Zn, As, Sb, Hg) та коефіцієнтів зональності для визначення напрямку та відстані до рудних тіл з точністю до 85-90% для гідротермальних родовищ

Інтеграція даних різних масштабів

Використання ГІС-технологій для узгодження супутникових знімків (1:50000), наземних зйомок (1:5000) та даних експлуатаційної розвідки (1:1000), що дозволяє виявити структурний контроль зруденіння

Практичне значення геометризації для гірничодобувної промисловості



Проектування гірничих підприємств

Обґрунтування меж гірничого відводу на основі тривимірних моделей родовища, вибір оптимальної системи розробки з урахуванням структурних особливостей масиву, проектування вентиляційних систем та транспортних шляхів



Планування видобувних робіт

Розробка календарних планів гірничих робіт на 5-10 років, управління якістю сировини через усереднення вмісту корисних компонентів, оптимізація послідовності відпрацювання блоків із застосуванням геостатистичних методів



Підвищення ефективності видобутку

Зниження експлуатаційних втрат корисних копалин до 5-8%, зменшення розубожування руди на 10-15%, оптимізація бортового вмісту з урахуванням ринкової кон'юнктури та операційних витрат, підвищення продуктивності виймального обладнання



Охорона надр та раціональне природокористування

Прогнозування та контроль деформацій земної поверхні, зниження обсягів відходів гірничого виробництва на 20-30%, планування поетапної рекультивації порушених земель, моніторинг впливу на підземні та поверхневі води з використанням ГІС-технологій



Порівняльний аналіз особливостей геометризації різних типів родовищ

| Тип родовища | Ключові параметри геометризації | Особливості методики |
|----------------------|---|---|
| Облицювальний камінь | Просторова орієнтація систем тріщин (азимут 40-60°, кут падіння 65-80°), блочність (0,8-1,5 м ³), міцність на стиск (80-120 МПа), водопоглинання (≤0,5%) | Метод "розгортки стінок" з кроком документації 2 м, лазерне сканування поверхні з точністю ±3 мм, розрахунок коефіцієнта анізотропії за методом Биховера-Глікмана |
| Вугілля | Гіпсометрія з кроком ізоліній 2-5 м, дійсна потужність пласта (0,8-2,5 м), зольність (8-25%), сірчистість (0,5-3,2%), метаноємність (5-25 м ³ /т с.б.м.) | Густота розвідувальної мережі 150×150 м, тектонічне районування за амплітудами розривів (H≥0,1m), побудова карт ізопотужностей з використанням геостатистичного крігінгу |
| Залізні руди | Кути падіння рудних тіл (45-85°), коефіцієнт рудоносності (0,6-0,9), вміст Feзаг (32-67%), вміст SiO ₂ (5-45%), класифікація за вмістом P ₂ O ₅ (≤0,07% - низькофосфористі, >0,07% - високофосфористі) | Побудова каркасних моделей з кроком 20-40 м, блокове моделювання методом IDW з радіусом впливу 75-120 м, класифікація ресурсів за JORC-кодом, геометризація зон вивітрювання за індексом RQD |
| Кольорові метали | Коефіцієнт рудоносності (0,3-0,7), кондиційні вмісти (Cu - 0,5-1,2%, Zn - 1-3%, Pb - 0,8-2,5%), індекс інтенсивності зруденіння (15-80), морфологічні типи (жильні, штокверкові, лінзоподібні з коеф. видовження 3,5-12) | Моделювання рудоконтролюючих розломів за методом "структурних домінант", анізотропний пошук за еліпсоїдом з осями 60×40×25 м, геометризація геохімічних ореолів за мультиплікативними показниками з використанням факторного аналізу |
| Золото | Коефіцієнт варіації вмістів (120-180%), коефіцієнт рудоносності (0,2-0,4), середній розмір золотин (0,05-2,5 мм), частка вільного золота (65-85%), вміст супутніх елементів (Ag - 5-15 г/т, As - 0,1-0,8%, Sb - 0,01-0,2%) | Використання індикаторного крігінгу з верхнім обмеженням 50 г/т, моделювання з інтервалом композитування 1 м, валідація за методом Q-Q діаграм, планування бортового вмісту за методом Лейна з урахуванням економічних параметрів NPV |

Сучасні тенденції в геометризації родовищ



Впровадження цих передових методів дозволяє підвищити достовірність геологічних моделей родовищ на 30-40% та суттєво знизити ризики при плануванні гірничих робіт.

Висновки



Ключова роль геометризації

Геометризація родовищ є фундаментальною основою геологічного вивчення надр, що забезпечує 95% точності при створенні тривимірних моделей родовищ. Використання методів варіограмного аналізу дозволяє встановити просторові закономірності розподілу вмісту металів з похибкою менше 3% та оптимізувати процес оконтурювання рудних тіл.



Специфіка різних типів родовищ

Для стратиформних родовищ оптимальними є методи крігінгу та кокрігінгу, що забезпечують точність прогнозу до 87%. Жильні родовища потребують застосування індикаторного крігінгу та нейромережевого моделювання, тоді як для штокверкових родовищ ефективними є методи стохастичного моделювання з використанням методу послідовного гауссівського моделювання.



Сучасні методи

Інтеграція даних буріння, геофізичних досліджень та дистанційного зондування у середовищі ГІС-платформ (Leapfrog, Micromine, Datamine) забезпечує підвищення достовірності моделей на 35-40%. Впровадження методів глибинного машинного навчання дозволило автоматизувати процес інтерпретації даних свердловин та зменшити час обробки на 68%.



Практичне значення

На родовищі Інгульське впровадження технологій геометризації дозволило зменшити обсяги пустої породи на 23% та підвищити вилучення корисних компонентів на 17%. Оптимізація контурів кар'єру Полтавського ГЗК за допомогою геометризаційних методів забезпечила економію 12,5 млн грн на видобувних роботах при одночасному збільшенні ресурсної бази на 8,2%.

