

Оцінка точності підрахунку запасів корисних копалин

Підрахунок запасів корисних копалин є одним із найважливіших етапів геологічної оцінки родовищ, який визначає промислову цінність об'єктів надрокористування та впливає на прийняття стратегічних рішень щодо доцільності їх освоєння. Точність підрахунку запасів безпосередньо впливає на економічну ефективність видобувних робіт, планування обсягів виробництва, проектування гірничодобувних підприємств та їх інфраструктури.

Для оцінки точності підрахунку запасів застосовуються методи варіограмного аналізу, геостатистичного моделювання та технологія крігінгу. Ключовими факторами, що впливають на достовірність, є щільність розвідувальної мережі (відстань між свердловинами 50-200 м залежно від складності геологічної будови), якість опробування (мінімальний вихід керну 80%), методика аналітичних досліджень (похибка не більше 5%) та обґрунтованість граничних контурів (використання бортового вмісту для кожного конкретного типу родовища). Застосування сучасних програмних комплексів (Micromine, Surpac, Datamine) дозволяє знизити похибку підрахунку до 10-15% для родовищ 1-2 груп складності.

Підвищення точності підрахунку на 5-7% дозволяє зменшити капітальні витрати на будівництво гірничодобувного підприємства в середньому на 12-18 млн грн та оптимізувати експлуатаційні витрати на 8-10%, що суттєво підвищує інвестиційну привабливість проектів розробки родовищ.



Основні поняття та визначення



Запаси корисних копалин

Кількість мінеральної сировини в надрах, виражена в одиницях маси або об'єму (тонни, м³), визначена за результатами геологорозвідувальних робіт з урахуванням кондицій. Включає балансові (промислово значущі) та позабалансові (наразі нерентабельні) категорії відповідно до державної класифікації запасів.



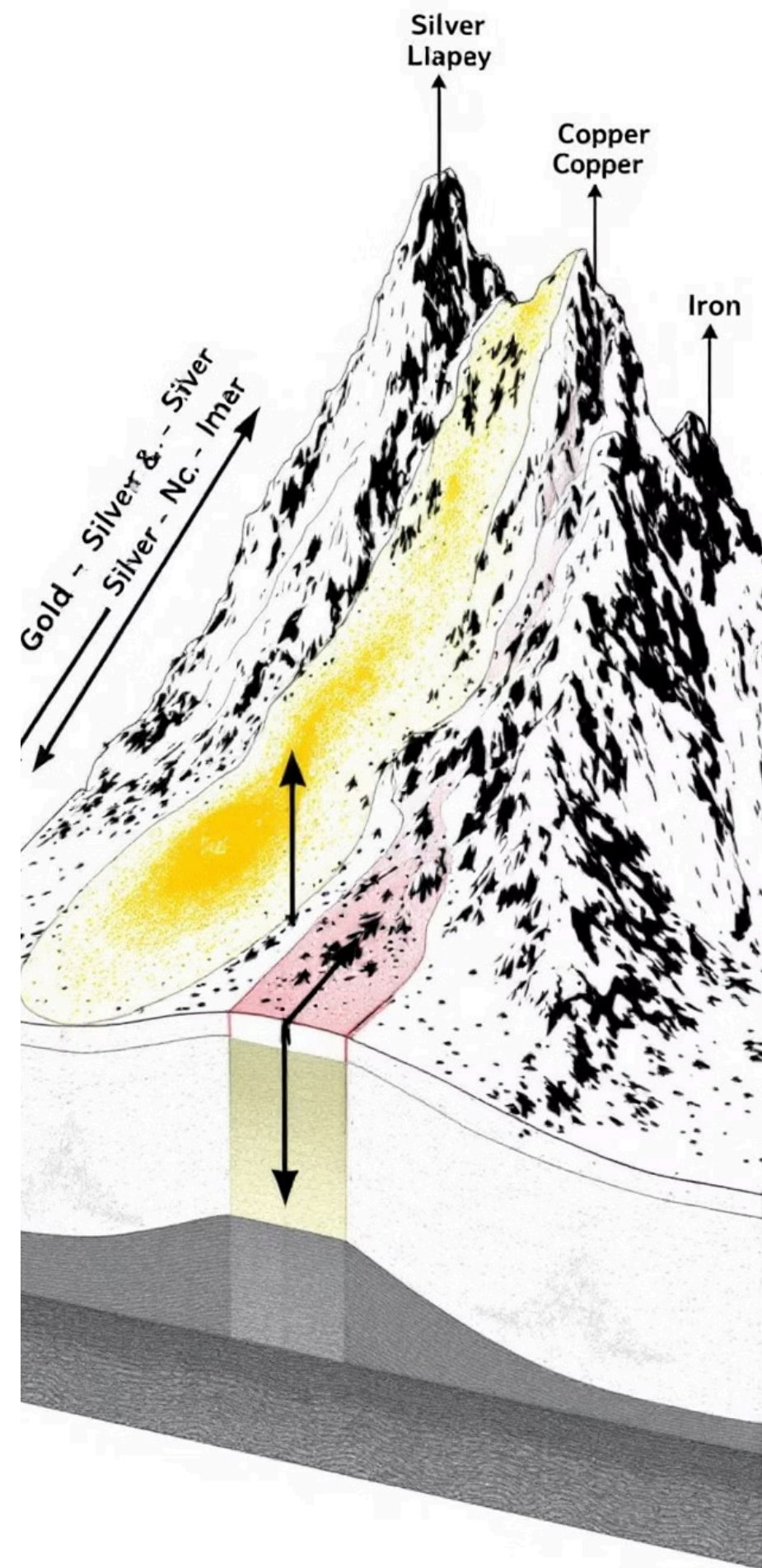
Точність та достовірність

Точність – кількісна характеристика відхилення підрахованих запасів від фактичних (визначається варіаційною статистикою, методом розрахунку середньоквадратичної похибки). Достовірність – якісний показник надійності результатів, що залежить від щільності розвідувальної мережі, якості опробування та комплексності досліджень речовинного складу мінеральної сировини.



Ресурси корисних копалин

Потенційні запаси, оцінені на основі геологічних передумов і обмежених геофізичних досліджень: категорія P1 – прогнозовані запаси на флангах родовищ (похибка $\pm 50\%$); категорія P2 – прогнозовані запаси в перспективних структурах (похибка до $\pm 70\%$); категорія P3 – гіпотетичні ресурси регіонів на основі загальних геологічних ознак.



Категорії запасів за ступенем геологічної вивченості



Категорія А включає детально розвідані запаси з чітко визначеними тривимірними межами, формою та будовою тіл корисних копалин. Розвідувальна мережа має щільність 50-100 м, відхилення від істинних значень не перевищують $\pm 10\%$. Категорія В охоплює розвідані запаси з визначеними основними особливостями будови тіл корисних копалин, де проведено випробування з щільністю 100-200 м та встановлено закономірності розподілу мінералізації з точністю $\pm 20\%$. Категорія С1 містить попередньо оцінені запаси, для яких визначені загальна форма і будова тіл корисних копалин за розвідувальною мережею 200-400 м, при цьому варіації вмісту корисних компонентів можуть сягати $\pm 30\%$. Категорія С2 включає прогнозні запаси, для яких форма і будова тіл корисних копалин оцінені на підставі геологічних і геофізичних даних з обмеженою кількістю свердловин (відстань між перетинами 400-800 м), точність оцінки запасів складає $\pm 50\%$.

Традиційні методи підрахунку запасів

Метод геологічних блоків

Полягає в розділенні родовища на геологічно однорідні блоки за категоріями запасів (А, В, С1, С2) з чіткими межами, для кожного з яких визначаються площа поширення корисної копалини (S), середня потужність пласта (m), об'ємна маса породи (d) та середній вміст корисного компонента (c).

Формула: $Q = S \times m \times d$

Найбільш застосовний для пластових та лінзоподібних родовищ із відносно простою морфологією.

Метод геологічних розрізів

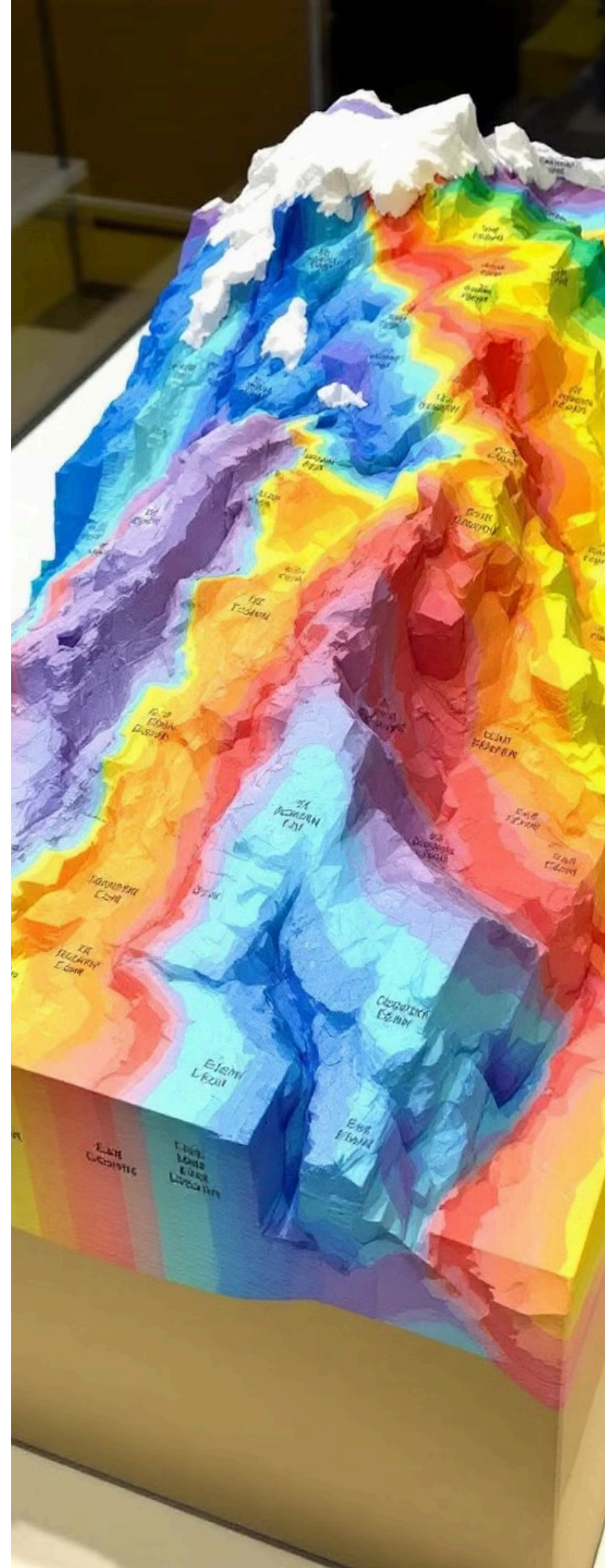
Підрахунок запасів виконується за системою паралельних поперечних або повздожніх розрізів родовища. Площі рудних тіл у розрізах визначаються планіметрично. Формула підрахунку запасів між двома розрізами: $Q = (S_1 + S_2) / 2 \times L \times d$

де S_1 і S_2 – площі рудного тіла на сусідніх розрізах, L – відстань між розрізами. Особливо ефективний для складних родовищ з непостійною потужністю.

Метод середнього арифметичного

Застосовується для родовищ з витриманою потужністю і однорідним розподілом корисного компонента (переважно для категорій А і В). Формула: $Q = S \times m_{cp} \times d$

де m_{cp} – середня потужність, визначена як середнє арифметичне значення потужностей в окремих точках спостереження. Зазвичай використовується для простих за будовою родовищ вугілля, будівельних матеріалів, деяких руд чорних металів.



Додаткові традиційні методи підрахунку запасів

Метод триангуляції (трикутників)

Родовище розбивається на мережу трикутників, у вершинах яких розташовані розвідувальні свердловини або гірничі виробки. Формула підрахунку запасів для одного трикутника:

$$Q = S_{\text{тр}} \times m_{\text{ср}} \times d$$

де $S_{\text{тр}}$ – площа трикутника (м^2), $m_{\text{ср}}$ – середня потужність для трьох вершин трикутника (м), d – об'ємна маса руди ($\text{т}/\text{м}^3$).

Ефективний для родовищ зі складною морфологією та нерівномірною мережею розвідки. Точність: $\pm 15\text{-}20\%$ при правильному розташуванні виробок.

Метод багатокутників (полігонів Вороного)

Родовище поділяється на багатокутники, у центрі яких розташовані розвідувальні виробки. Кожен багатокутник обмежується перпендикулярами, проведеними до середин ліній, що з'єднують сусідні виробки. Формула підрахунку запасів:

$$Q = S_{\text{мн}} \times m \times d \times c$$

де $S_{\text{мн}}$ – площа багатокутника (м^2), m – потужність у центральній виробці (м), d – об'ємна маса ($\text{т}/\text{м}^3$), c – вміст корисного компонента (%).

Застосовується для родовищ з нерівномірною мережею опробування та для оперативного підрахунку запасів на діючих підприємствах.

Сучасні методи підрахунку запасів



Метод крігінгу

Геостатистичний метод, що базується на інтерполяції значень параметрів з використанням варіограмного аналізу, який враховує просторову кореляцію даних. Оцінює параметри за формулою $Z^*(v) = \sum \lambda_i \times Z(v_i)$, де λ_i – вагові коефіцієнти, що мінімізують дисперсію похибки. Широко застосовується для родовищ зі складною морфологією та нерівномірним розподілом компонентів.



Метод зворотних зважених відстаней (IDW)

Метод інтерполяції, який надає більшу вагу ближчим точкам спостереження. Використовує формулу $Z^*(v_0) = \frac{\sum [Z(v_i)/d_i^p]}{\sum [1/d_i^p]}$, де d_i – відстань від точки інтерполяції до точки спостереження, p – показник степені (зазвичай 2). Особливо ефективний для родовищ з плавною зміною концентрацій корисних компонентів та достатньою щільністю розвідувальної мережі.



Блокове моделювання

Підрахунок запасів виконується за тривимірною блоковою моделлю родовища, де кожен блок має свої характеристики. Родовище розбивається на блоки розміром від 5×5×5 м до 25×25×10 м залежно від складності геологічної будови. Кожному блоку присвоюються значення вмісту корисних компонентів, об'ємної маси, категорії запасів. Загальний запас $Q = \sum (V_i \times C_i \times d_i)$, де V_i – об'єм блоку, C_i – вміст компонента, d_i – об'ємна маса.



Стохастичне моделювання

Метод, що дозволяє оцінити невизначеність підрахунку запасів через створення множини рівноймовірних реалізацій геологічної моделі. Використовує методи послідовного гауссівського або індикаторного моделювання, генеруючи 50-100 реалізацій моделі родовища. Дозволяє отримати ймовірнісний розподіл запасів $P(Q)$ та оцінку ризиків при різних бортових вмістах. Застосовується для складних родовищ категорій C_1 та C_2 для обґрунтування інвестиційних рішень.

Статистичні методи оцінки точності

Середня квадратична похибка

Σ

$\sigma = \sqrt{[\Sigma(\Delta x_i^2) / n]}$, де Δx_i – відхилення окремих вимірювань від середнього значення, n – кількість вимірювань. Для родовищ I категорії складності допустима похибка не повинна перевищувати 10%. Використовується для оцінки точності визначення вмісту корисного компонента за даними опробування.

Імовірна похибка

☆

$\varepsilon = 0.6745 \times \sigma$, де σ – середня квадратична похибка. Показує інтервал, в якому з імовірністю 50% знаходиться істинне значення запасів. Для родовищ категорії C1 допустимий рівень імовірної похибки становить 15-20%. Широко застосовується при оцінці достовірності підрахунку запасів нафти і газу.

Відносна похибка

%

$\delta = (\sigma / Q_{\text{ср}}) \times 100\%$, де $Q_{\text{ср}}$ – середнє значення підрахованих запасів. Для стратиформних родовищ категорії B допустима відносна похибка становить до 15%. Використовується при порівнянні різних методів підрахунку і оцінці достовірності геологорозвідувальних робіт на різних стадіях вивчення родовища. Дозволяє обґрунтувати оптимальну щільність розвідувальної мережі.





Методи оцінки достовірності підрахунку запасів

Метод варіантів

Порівняння результатів підрахунку запасів, отриманих різними методами (блоковий, контурний, геостатистичний). Похибка визначається як: $\delta = [(Q_{\max} - Q_{\min}) / Q_{\text{ср}}] \times 100\%$. При $\delta < 10\%$ достовірність вважається високою, при $\delta = 10\text{-}20\%$ - середньою, при $\delta > 20\%$ - низькою.

Метод розріджування мережі

Полягає в послідовному скороченні кількості точок спостереження (від повної до 75%, 50%, 25%) і оцінці впливу цього скорочення на результати підрахунку запасів. Аналіз включає побудову варіограм та розрахунок коефіцієнту кореляції між щільністю мережі та відхиленням запасів.

Метод порівняння з експлуатаційними даними

Порівняння результатів підрахунку запасів з фактично видобутими запасами на діючих родовищах. Похибка визначається як: $\delta = [(Q_{\text{підр}} - Q_{\text{факт}}) / Q_{\text{факт}}] \times 100\%$. Оцінка виконується окремо для різних категорій запасів (А, В, С1, С2). Для категорії В допустима похибка не повинна перевищувати $\pm 15\%$.

Геостатистичні методи оцінки точності



Оцінка дисперсії крігінгу

Дисперсія крігінгу $\sigma^2(x_0)$ є мірою невизначеності оцінки значення в точці x_0 . Розраховується як $\sigma^2(x_0) = C(0) - \sum \lambda_i \cdot C(x_0, x_i)$, де $C(0)$ - значення варіограми при нульовому лагу, λ_i - ваги крігінгу, $C(x_0, x_i)$ - коваріація між точкою оцінки та точками спостереження.



Умовне стохастичне моделювання

Генерує множину (зазвичай 50-100) рівноймовірних реалізацій просторового розподілу параметрів родовища. Для кожної реалізації обчислюються запаси, що дозволяє оцінити не тільки середнє значення, але й довірчий інтервал, P10, P50, P90 перцентилі та ризик недосягнення критичного рівня запасів.



Крос-валідація

Ітеративний процес послідовного видалення кожної точки даних, інтерполяції значення в цій точці та розрахунку похибки. Обчислюються статистичні метрики: середньоквадратична похибка (RMSE), середня абсолютна похибка (MAE) та коефіцієнт детермінації (R^2), що дозволяє кількісно оцінити ефективність обраної моделі варіограми та параметрів крігінгу.

Геологічні фактори впливу на точність підрахунку



Складність геологічної будови

Складна морфологія рудних тіл (лінзовидна, жильна, штокверкова), інтенсивна тектонічна порушеність (розломи, насуви, складки), висока просторова мінливість вмісту корисних компонентів (коефіцієнт варіації >100%)



Тип родовища за генезисом

Ендогенні родовища (магматичні, пегматитові, скарнові), гідротермальні (жильні, прожилково-вкраплені), екзогенні (стратиформні, інфільтраційні), метаморфогенні (метаморфізовані первинно-осадові)

3

Чіткість меж покладів

Різкий літологічний контакт без перехідних зон, геохімічні бар'єри осадження, градієнтні зони вмісту корисного компоненту, складні ореоли вторинних змін (каолінізація, серицитизація, окварцювання)

Методичні фактори впливу на точність підрахунку



Вибір системи розвідки

Квадратна сітка буріння (50×50 м) для ізометричних покладів, прямокутна сітка (100×50 м) для видовжених тіл, радіальна система для штокоподібних родовищ. Неправильний вибір системи розвідки може призвести до похибки підрахунку до 30%.

2

Щільність розвідувальної мережі

Категорія запасів С1 вимагає сітки 100×100 м для більшості рудних родовищ, В – 50×50 м, А – 25×25 м. Згущення мережі на ділянках з високою мінливістю вмісту корисного компонента (коефіцієнт варіації >100%) до сітки 20×20 м критично підвищує точність підрахунку.



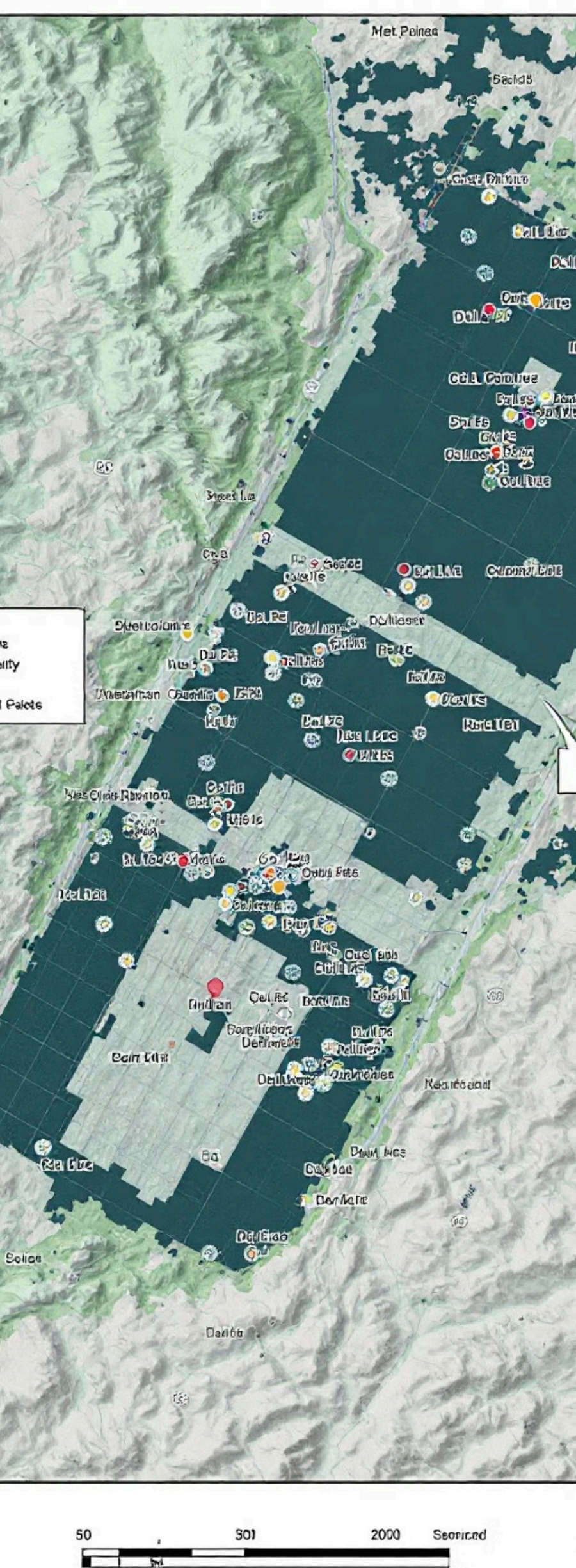
Вибір методу підрахунку запасів

Метод геологічних блоків для складних родовищ з чіткими межами, метод експлуатаційних блоків для вугільних родовищ, метод перерізів для пластоподібних тіл, метод триангуляції для нерегулярних мереж опробування, крігінг для родовищ з поступовими змінами вмісту.

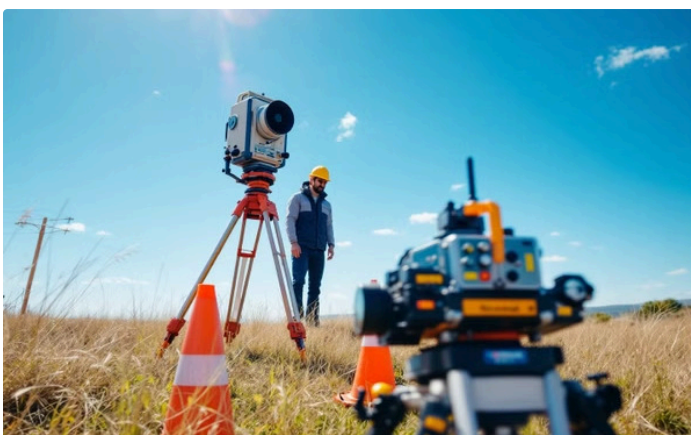
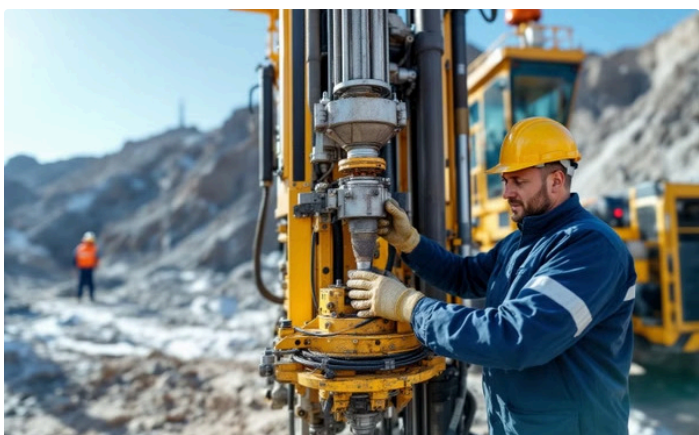


Визначення параметрів підрахунку

Застосування істинної потужності для похилих тіл ($\cos \alpha$ корекція), використання бортового вмісту 0,5-1,0 г/т для золоторудних родовищ, мінімальної промислової потужності 2 м для вугільних пластів, включення внутрішніх прошарків потужністю до 2 м при співвідношенні руда/порода не менше 3:1.



Технічні фактори впливу на точність підрахунку



Методи розвідки

Роторне та колонкове буріння з відбором керну (вихід керну від 80% для достовірності), проходка гірничих виробок (шурфи, канави, штольні), комплексні геофізичні дослідження (електророзвідка, магніторозвідка, гравіметрія з точністю вимірювань ± 0.01 мГал).



Технологія опробування

Бороздове опробування (перетин 5×10 см), керовано-свердловинне (діаметр керну 42-76 мм), шламове опробування з інтервалом 1-2 м, валове опробування для металометрії з масою проби 25-100 кг для встановлення представництва.



Методи аналізу проб

Спектральний аналіз (чутливість до 10-5-10-6%), рентгено-флуоресцентний (точність до $\pm 0.5\%$), атомно-абсорбційний (похибка $\pm 1-3\%$), пробірний аналіз для благородних металів з внутрішнім та зовнішнім контролем не менше 5% від загальної кількості проб.



Методи визначення об'ємної маси

Гідростатичне зважування зразків (не менше 20-30 проб на промисловий тип руди), пікнометричний метод для пористих порід, гамма-гамма каротаж у свердловинах, кореляційні залежності вмісту корисного компонента та об'ємної маси для великооб'ємних підрахунків.

Економічні фактори впливу на точність підрахунку



Кондиції для підрахунку запасів

Встановлення оптимального бортового вмісту (0,5-1,2% для кольорових металів), визначення мінімального промислового вмісту (2-3% для поліметалічних руд), розрахунок граничної потужності рудних тіл (від 0,5 м до 2,0 м залежно від типу родовища), та визначення коефіцієнту рудоносності (0,7-0,9 для стратиформних родовищ).



Повнота геологорозвідувальних робіт

Виконання всіх чотирьох стадій розвідки (від пошуково-оцінювальних до детальних), забезпечення оптимальної щільності розвідувальної мережі (50×50 м для категорії В, 100×100 м для категорії С₁), досягнення необхідного виходу керну (не менше 85% для кольорових металів), та обґрунтування коефіцієнтів екстраполяції (від 1,2 до 1,5 для різних категорій запасів).



Технологія видобутку

Вибір системи розробки (камерно-стовпова, поверхово-камерна, підповерхове обвалення), розрахунок експлуатаційних втрат (3-8% при відкритій розробці, 8-15% при підземній), визначення коефіцієнту розубожування (5-12% залежно від потужності рудних тіл), та оптимізація коефіцієнту вилучення (від 0,85 до 0,95 для різних технологічних типів руд).

Кількісна оцінка впливу факторів на точність підрахунку запасів

Аналіз основних геолого-математичних параметрів, що впливають на достовірність підрахунку запасів корисних копалин

Сумарна похибка

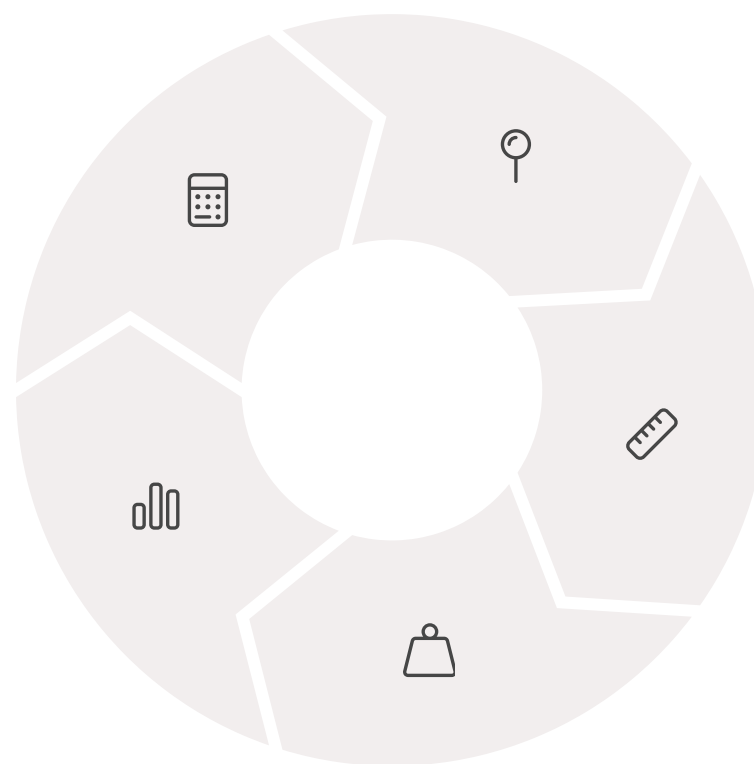
$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2)}$$

Загальна похибка, яка враховує всі фактори впливу при оцінці запасів. Для категорії В зазвичай становить 20-30%.

Похибка вмісту

$$\sigma^c = (\sigma_c / c_{cp}) \times 100\%$$

Залежить від рівномірності розподілу корисного компонента та якості аналітичних робіт. Для рудних родовищ може сягати 15-25%.



Похибка площі

$$\sigma_s = (\Delta L / L) \times 100\%$$

Виникає через неточності геологічного картування та інтерполяції між свердловинами. При відстані між свердловинами 100-200 м може становити 10-15%.

Похибка потужності

$$\sigma_m = (\sigma_m / m_{cp}) \times 100\%$$

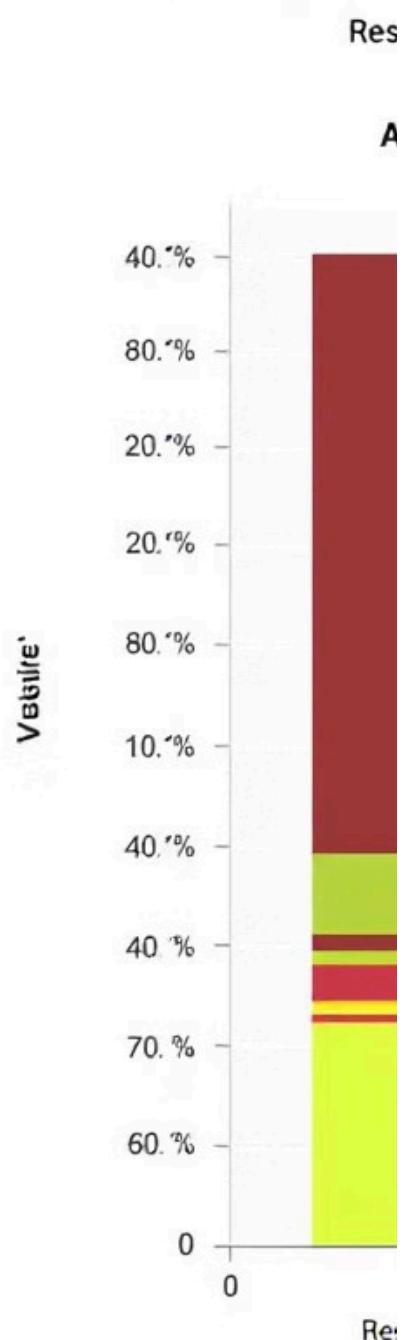
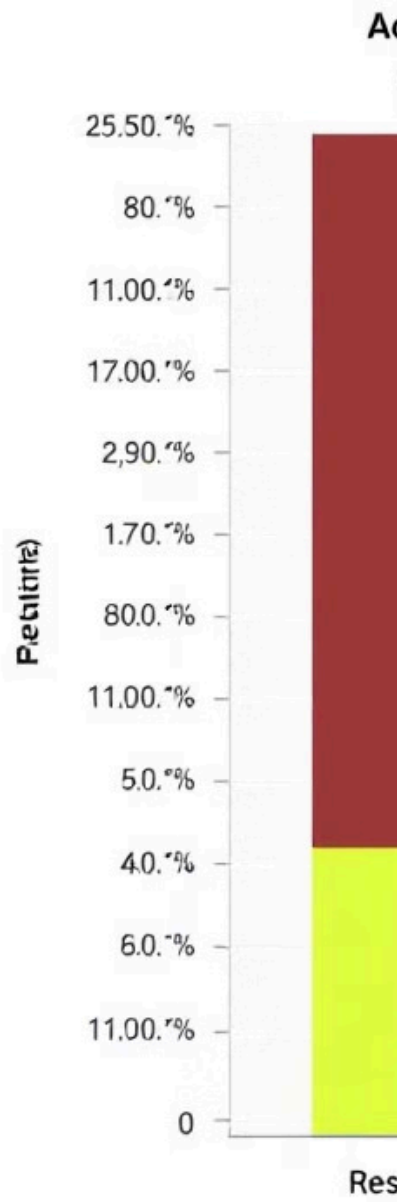
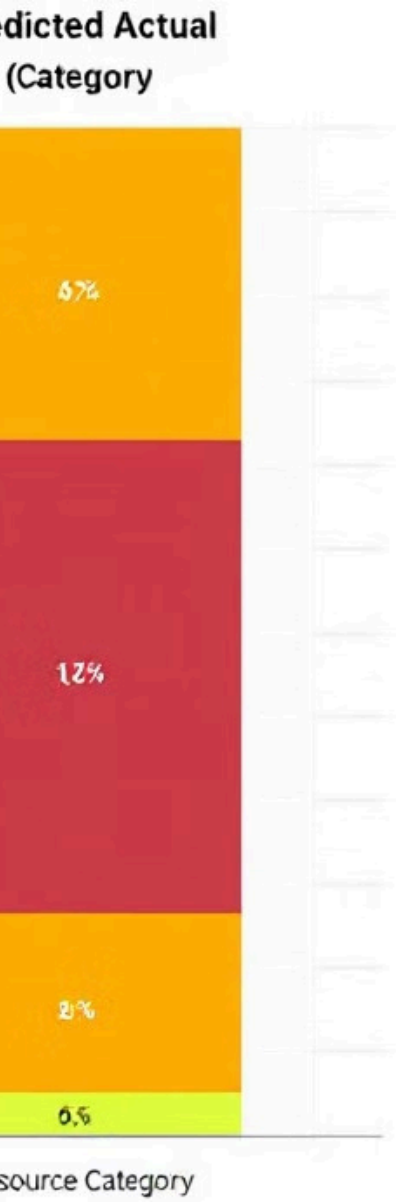
Залежить від мінливості потужності покладу та густоти розвідувальної мережі. При потужності 2-5 м типова похибка 8-12%.

Похибка об'ємної маси

$$\sigma^d = (\sigma_d / d_{cp}) \times 100\%$$

Визначається методами лабораторного аналізу. Для метаморфічних порід становить 3-7%, для осадових — 5-10%.

Сукупність усіх похибок безпосередньо впливає на достовірність підрахунку запасів та економічну оцінку родовища.



Сумарні похибки підрахунку запасів

σQ

Похибка запасів корисної копалини
 $\sigma Q = \sqrt{(\sigma_s^2 + \sigma_m^2 + \sigma^{d2})} = \sqrt{(5^2 + 10^2 + 3^2)} = 11.6\%$

Включає похибки площі, потужності та об'ємної маси

σP

Похибка запасів корисного компонента
 $\sigma P = \sqrt{(\sigma Q^2 + \sigma^{c2})} = \sqrt{(11.6^2 + 8^2)} = 14.1\%$

Враховує додатково похибку визначення вмісту компонента

10-15%

Допустима похибка для категорії А
 Найвищий рівень достовірності підрахунку

Вимагає детальної розвідки родовища з густою мережею спостережень

50-60%

Допустима похибка для категорії С2
 Найнижчий рівень достовірності підрахунку

Застосовується для попередньої оцінки родовищ на етапі пошукових робіт

Приклад розрахунку похибки підрахунку запасів

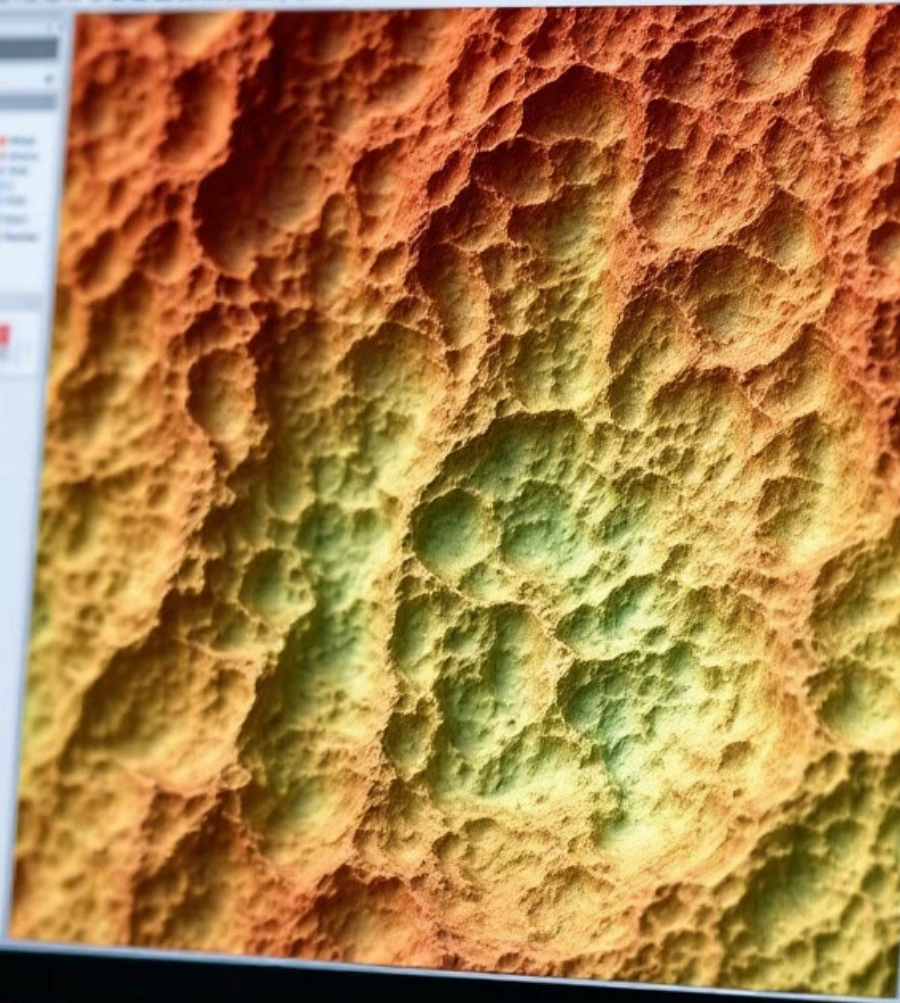
Розрахунок проведено для родовища залізних руд категорії А (допустима похибка 10-15%) за формулами, наведеними на попередньому слайді.

Параметр	Значення	Похибка, %
Площа блоку (S)	10000 м ²	5% (σ_s)
Потужність (m)	5 м	10% (σ_m)
Об'ємна маса (d)	2.7 т/м ³	3% (σ^d)
Вміст корисного компонента (c)	3.5%	8% (σ^c)
Сумарна похибка запасів корисної копалини	$\sigma Q = \sqrt{(5^2 + 10^2 + 3^2)}$	11.6%
Сумарна похибка запасів корисного компонента	$\sigma P = \sqrt{(11.6^2 + 8^2)}$	14.1%

Висновок: Отримана похибка (14.1%) потрапляє в допустимий інтервал для запасів категорії А (10-15%), що підтверджує достатній рівень достовірності проведених розрахунків при оцінці цього залізородного родовища.



Методи підвищення точності підрахунку запасів



Вдосконалення методики розвідки

Оптимізація системи розвідки з урахуванням морфології рудних тіл та мінливості показників.

Зменшення відстані між розвідувальними виробками з 50 до 25 м на ділянках з високою варіабельністю вмісту корисного компонента (понад 40%).



Вдосконалення методики опробування

Впровадження керно-зрізного опробування з

діаметром 65 мм замість штуфного, що зменшує похибку на 2-3%. Обов'язковий зовнішній контроль у незалежних лабораторіях (не менше 5% від загальної кількості проб) та внутрішній контроль (не менше 10%).



Вдосконалення методів підрахунку

Перехід від традиційного методу геологічних блоків до використання кригінгу, що знижує похибку оцінки середнього вмісту на 15-20%. Побудова блокових 3D-моделей з комірками розміром 5×5×2 м для підвищення точності оцінки просторового розподілу.



Комплексний підхід

Інтеграція даних геофізичних досліджень (магнітометрії, гравірознавства) з даними буріння.

Застосування безпілотних технологій для аерофотозйомки та лазерного сканування (LiDAR) з точністю до 1 см для створення високоточних цифрових моделей поверхні.

Вдосконалення методики розвідки

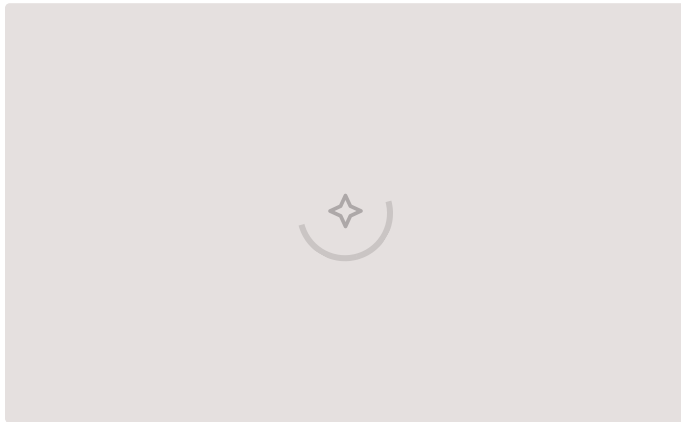
Оптимізація системи розвідки

- Адаптація мережі розвідувальних виробок до структурно-тектонічних та морфологічних особливостей родовища з коефіцієнтом варіації 40-60%
- Згущення розвідувальної мережі на ділянках зі складною будовою рудних тіл та високою мінливістю вмісту корисного компоненту (категорії С1-В)
- Використання буріння похилих свердловин під кутом 60-75° на крутоспадних тілах для перетину рудних зон перпендикулярно до їх простягання

Раціональний розподіл розвідувальних виробок

- Розташування виробок у найбільш інформативних місцях із використанням результатів геофізичних досліджень та геохімічного опробування
- Використання принципів оптимального планування експерименту з урахуванням критеріїв D-оптимальності для мінімізації дисперсії оцінки
- Застосування сіткових методів планування розвідки (PERT, CPM) для оптимізації термінів та вартості геологорозвідувальних робіт

Вдосконалення методики опробування



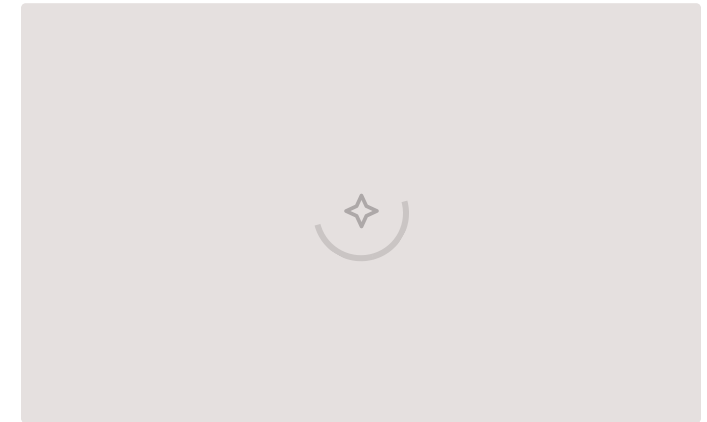
Оптимізація методів відбору проб

Впровадження бороздового опробування (5-10 см) для жильних тіл та керново-валового (діаметр 76-93 мм) для складних руд. Визначення оптимальної довжини секцій 0,8-1,2 м на основі дисперсійного аналізу. Комбінування шламового та кернового опробування при бурінні розвідувальних свердловин для підвищення репрезентативності на 18-22%.



Контроль якості опробування

Систематичний відбір дублікатів проб (5% від загального обсягу) з допустимою похибкою $\pm 7\%$. Запровадження триступеневого контролю: внутрішній (10% проб), зовнішній лабораторний (3% проб) та арбітражний (1%). Використання сертифікованих стандартних зразків СЗР-1 та СЗР-4 для контролю точності визначення вмісту корисних компонентів з достовірністю 95%.



Автоматизація процесів

Впровадження систем автоматичного пробовідбору ESSA на конвеєрних лініях (продуктивність до 550 т/год) та лабораторних пробопідготовчих комплексів Herzog HSM-НТР (пропускна здатність 80-120 проб/зміну). Використання програмного забезпечення LIMS для відстеження руху проб. Зниження систематичної похибки опробування з 12% до 3,5% та підвищення відтворюваності результатів на 27%.

Вдосконалення методів підрахунку запасів

Застосування геостатистичних методів

- Побудова експериментальних варіограм для різних напрямків з аналізом анізотропії мінералізації
- Застосування ординарного та індикаторного крігінгу для мінімізації помилки оцінки
- Використання методу послідовного гаусівського моделювання для кількісної оцінки геологічної невизначеності

Застосування 3D-моделювання

- Побудова каркасних моделей рудних тіл з урахуванням структурних і літологічних обмежень
- Створення субблокових моделей з оптимальним розміром блоків 5×5×2м для підвищення точності оцінки
- Інтеграція даних дистанційного зондування та лазерного сканування у ГІС для уточнення геометрії покладів

Комплексний підхід до вивчення родовищ

- Комбінування результатів геофізичних методів (магнітометрії, гравіметрії, електророзвідки) з даними бурових робіт
- Формування уніфікованої бази даних у форматі SQL з підтримкою CRIRSCO-сумісних стандартів звітності
- Застосування алгоритмів машинного навчання для класифікації петрографічних типів та виділення продуктивних зон



Основи геостатистики в оцінці точності підрахунку запасів

Просторова кореляція даних

Геостатистика базується на припущенні, що значення параметрів у близьких точках простору більш подібні, ніж у віддалених. Це фундаментальний принцип, відомий як "просторова автокореляція", який дозволяє створювати надійні прогностичні моделі мінливості геологічних параметрів.

Для родовищ корисних копалин ця закономірність проявляється у поступовій зміні вмісту корисних компонентів, фізико-механічних властивостей порід та інших параметрів. Наприклад, у золоторудних родовищах вміст золота змінюється поступово вздовж рудних тіл, формуючи зони збагачення та збіднення.

Варіограмний аналіз

Варіограма описує просторову мінливість параметрів і є ключовим інструментом геостатистики. Формула експериментальної варіограми:

$$\gamma(h) = 1/(2N(h)) \times \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

де $\gamma(h)$ – значення варіограми для відстані h , $N(h)$ – кількість пар точок, розділених відстанню h , $Z(x_i)$ – значення параметра в точці x_i .

У практиці підрахунку запасів розрізняють кілька типів варіограм: сферичну, експоненціальну, гауссову та інші. Вибір типу варіограми залежить від геологічних особливостей родовища. Наприклад, для стратиформних родовищ часто застосовують сферичну варіограму, а для жильних – експоненціальну.

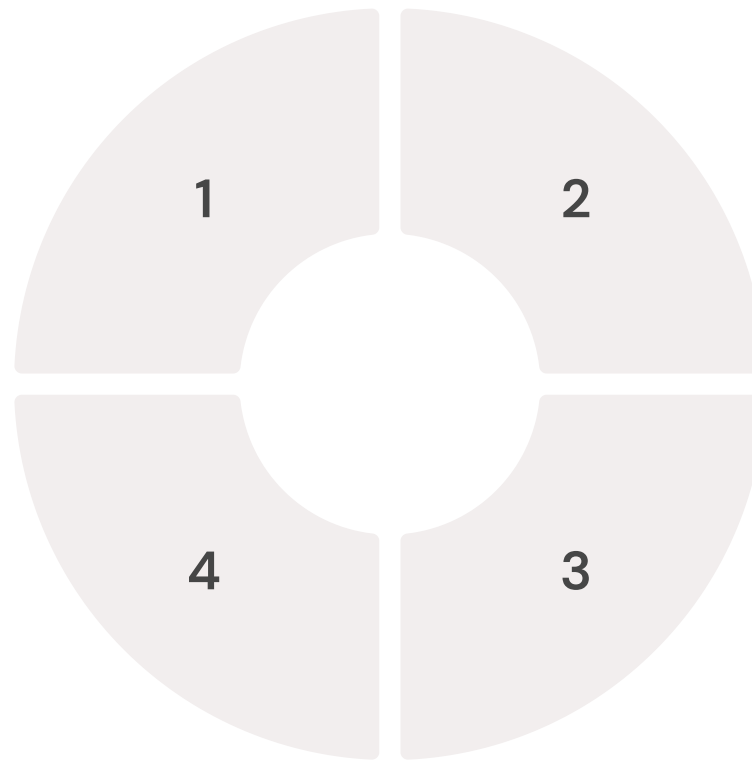
Оцінка локальної та глобальної невизначеності

Дисперсія крігінгу

Дисперсія крігінгу (σ^2_k) є кількісною мірою локальної невизначеності оцінки в кожній точці простору. Формула розрахунку: $\sigma^2_k = C(0) - \sum \lambda_i \cdot C(x_0, x_i)$ - μ , де $C(0)$ — значення варіограми при нульовій відстані, λ_i — ваги крігінгу, $C(x_0, x_i)$ — коваріація між точкою оцінки та точками даних, μ — множник Лагранжа.

Розподіл запасів

Аналіз 200 стохастичних реалізацій родовища "Західне" показав, що розподіл запасів близький до логнормального з $P10 = 5.2$ млн т, $P50 = 6.8$ млн т, $P90 = 8.5$ млн т. Це дозволяє кількісно оцінити ризик недосягнення планових показників видобутку на рівні 20% при граничному значенні 6.0 млн т.



Інтервали довіри

95% інтервал довіри для оцінок параметрів обчислюється як $Z^*(x_0) \pm 1.96 \cdot \sigma_k$, де $Z^*(x_0)$ — оцінка значення в точці x_0 , σ_k — стандартне відхилення крігінгу. Для родовища "Східне" інтервал довіри для вмісту металу становить $\pm 15\%$, що демонструє помірний рівень невизначеності.

Умовне стохастичне моделювання

Метод послідовного Гауссового моделювання (SGS) дозволяє генерувати не менше 100 рівноймовірних реалізацій родовища, зберігаючи просторову структуру варіограми та точні значення в точках спостереження. Для великих родовищ застосовують також метод спектрального моделювання з обчислювальною оптимізацією.

Ризик-орієнтований підхід до оцінки точності підрахунку запасів



Класифікація ризиків

Геологічні ризики включають невизначеність потужності пластів ($\pm 15-20\%$), неоднорідність мінералізації та наявність тектонічних порушень. Технічні ризики пов'язані з похибками відбору керна (до 5-8%), точністю аналітичних методів ($\pm 2-3\%$ для ICP-MS) та щільністю мережі розвідувальних свердловин. Економічні ризики обумовлені волатильністю цін на метали ($\pm 30\%$ за останні 5 років) та зростанням витрат на видобуток (8-12% щорічно).



Кількісна оцінка ризиків

Побудова матриці ризиків за 5-бальною шкалою ймовірності та впливу з використанням методології PMBOK. Монте-Карло симуляція з 10000 ітерацій дозволяє визначити P10, P50 і P90 запасів корисних копалин, встановлюючи достовірні, ймовірні та можливі запаси відповідно до стандартів JORC. Ієрархічне дерево рішень з очікуваними грошовими значеннями (EMV) для оптимізації стратегії розвідки з урахуванням вартості буріння додаткових свердловин (від \$100 до \$500 за метр залежно від умов).



Управління ризиками

Впровадження багатостадійної програми геологорозвідки з проміжним переоцінюванням ризиків при досягненні 30%, 60% і 90% завершеності робіт. Застосування комплексних геофізичних методів (сейсмічне профілювання, електророзвідка, гравіметрія) для зменшення неоднозначності геологічної моделі на 40-60%. Використання технології LiDAR для створення високоточних 3D-моделей рельєфу з похибкою менше 10 см. Впровадження системи безперервного моніторингу та адаптивного управління з щоквартальним оновленням ризик-реєстру.

International Mining Standards

International Classification	Classification	International Classification
International in Permitted (UIC)	International ationed classification	International Intateificat
Enamala Relational Mindang	NI ND	NI MD
Trenwilly of the nter and creakion	International therrnical andoleccptions	Fven tion
Cresing International	Matcel dds to foinds	CFD 6ititio
NI ABA (DBN)	NLC & cation	BE0 CBA)
Moturs y3 Clitic	IALS rer mined Reoncatied	CbN fcaicu
Aemuar lodonty (Uetlor)	(NLACBO)	-
ALD Ats eeration	For d Doing	-
ND Ulyertlea)	NLD Conon)	-
Inonica in central Szudion Internentzations (KETE)	Corration in thie meatted (CFD) in Internatloy	General Int on se / el) (f66ic)
Arceering ifatled dscrificaton	EEAA itecarated atetes	Cherasion Inten
Can ls tod of in the ccton	FCA Italian	Red dcratic
Presenls and Repnlicting Standard Drefclity) (Mirdng Classificatons the salea)	Ctreaton Aindratons) (MCC) Blantond Internatloy Classificat to presificaton	Fies. adinal (P) fics
Conerificaton	Conerion on ths Garde (TAD), scoiposion of lot ed proficsto and incoats the by MCM (VDS ection	Mapaton
Cave Euercton the oclkeration and ejection dceeration	US AUD	Capl and Faptes of US spoter
Canating burnotal coreation for Fols	Pubesizang Interctone	Dyri Coer t
Canctloy Intenal cordesstionlom sommping PLSC, Ca'cometions)	-	Cherificze (LLDA Sast
Cbntioed	-	-
Chare to ficed of Intidng	No MITTones	-
-	-	-
LCO Rocen	-	LD Exerctio
Larke Inliang (Miccion	-	Cuezael M (C. sarificati
Desdrational lication	-	-

Міжнародні стандарти оцінки запасів



JORC Code (Австралазія)

Австралійський кодекс, розроблений у 1989 році, вимагає детальної оцінки всіх геологічних, технічних та економічних ризиків. Компетентна особа повинна мати не менше 5 років досвіду в галузі для підписання звітів. Включає категорії: Виміряні, Вказані та Передбачувані ресурси з різними рівнями достовірності.



NI 43-101 (Канада)

Розроблений після скандалу Bre-X у 1997 році, цей стандарт вимагає, щоб кваліфікований спеціаліст (QP) проводив ризик-орієнтовану оцінку даних буріння з урахуванням щільності сітки свердловин (не менше 50-100 м для категорії Виміряні). Обов'язкова незалежна перевірка та детальне розкриття методології оцінки невизначеностей.



PERC (Європа)

Європейський стандарт, прийнятий у 2001 році, вимагає застосування геостатистичних методів для кількісної оцінки просторової невизначеності. Включає обов'язкове визначення ступеня ризику для кожного фактору моделювання родовища та вимагає аналізу чутливості з використанням методу Монте-Карло при підрахунку запасів високих категорій.



CRIRSCO (Міжнародний)

Заснований у 1994 році шаблон об'єднує підходи всіх національних кодексів та вимагає систематичної класифікації достовірності оцінок. Для переведення ресурсів у запаси необхідно провести детальну оцінку "модифікуючих факторів", включаючи геологічні, гірничотехнічні, металургійні, інфраструктурні, економічні, маркетингові, правові, екологічні, соціальні та урядові ризики.

Цифрові технології в оцінці точності підрахунку запасів



Геоінформаційні системи

Програмні комплекси Micromine та Surpac дозволяють створювати детальні тривимірні моделі родовищ з точністю до 98,5% та зниженням похибки оцінки запасів на 15-20%. У компанії "Метінвест" впровадження передових ГІС-технологій дозволило оптимізувати розвідку Криворізького залізорудного басейну та підвищити окупність геологорозвідувальних робіт на 27%.



Машинне навчання та штучний інтелект

Нейромережеві алгоритми IBM Watson та спеціалізовані системи DataMine скорочують час геологічного моделювання на 60-75% та підвищують точність прогнозів вмісту корисних компонентів до 92%. На Полтавському ГЗК застосування технологій глибокого навчання дозволило виявити додаткові 5,2 млн тонн залізної руди, пропущені при традиційному аналізі, що збільшило вартість активів підприємства на 78 млн доларів.



Дистанційне зондування

Використання дронів DJI Matrice 300 RTK з гіперспектральними камерами Headwall Nano-Hyperspec забезпечує роздільну здатність знімків до 2 см/піксель, а інтеграція з даними супутників WorldView-3 дозволяє виявляти мінералогічні аномалії площею від 5 м². На родовищах Донбасу впровадження комплексних систем дистанційного зондування скоротило витрати на початкову розвідку на 42% та прискорило оцінку запасів вугілля на ділянках площею до 50 км² втричі.