

Підрахунок запасів корисних копалин

Підрахунок запасів корисних копалин є одним з найважливіших завдань геології надр. Точність підрахунку запасів має величезне значення для планування гірничих робіт, визначення економічної доцільності розробки родовища та оцінки його вартості.

Загальні принципи підрахунку запасів

Для підрахунку запасів твердих корисних копалин використовується загальна формула: $Q = V \cdot d \cdot c$ де: • Q - запаси корисного компонента • V - об'єм рудного тіла • d - об'ємна маса (щільність) руди • c - вміст корисного компонента в руді В залежності від складності геологічної будови родовища та наявної інформації застосовуються різні способи підрахунку запасів.

Спосіб середнього арифметичного

Спосіб середнього арифметичного базується на визначенні середніх значень площі поперечного перерізу рудного тіла та вмісту корисного компонента. Це один із найпростіших методів підрахунку запасів, який передбачає усереднення значень параметрів родовища.

Формули та алгоритм

- Визначення середньої площі поперечного перерізу: $S = (S_1 + S_2 + \dots + S_n) / n$ де: S_1, S_2, \dots, S_n - площі поперечних перерізів рудного тіла, визначені за даними розвідувальних виробок, n - кількість перерізів
- Визначення середньої потужності рудного тіла: $m = (m_1 + m_2 + \dots + m_n) / n$ де: m_1, m_2, \dots, m_n - потужності рудного тіла в точках опробування, n - кількість точок опробування
- Визначення об'єму рудного тіла: $V = S \cdot L$ або $V = F \cdot m$ де: L - довжина рудного тіла, F - площа поширення рудного тіла в плані, m - середня потужність рудного тіла
- Визначення запасів корисного компонента: $Q = V \cdot d \cdot c$ де: d - середня об'ємна маса (щільність) руди, c - середній вміст корисного компонента, розрахований як: $c = (c_1 + c_2 + \dots + c_n) / n$ або $c = \sum(c_i \cdot V_i) / \sum V_i$ де: c_i - вміст корисного компонента в i -тій пробі, V_i - об'єм руди, що відповідає i -тій пробі

Детальний алгоритм застосування

- Збір даних про площі перерізів або потужності рудного тіла у всіх доступних точках опробування.
- Розрахунок середніх значень площі перерізу або потужності.
- Визначення площі поширення рудного тіла в плані за геологічними даними.
- Розрахунок об'єму рудного тіла.
- Збір даних про вміст корисного компонента та щільність руди.
- Розрахунок середніх значень вмісту корисного компонента та щільності.
- Обчислення загальних запасів за формулою $Q = V \cdot d \cdot c$.

Приклад розрахунку

Нехай маємо пластове родовище із середньою потужністю 5 м, площею поширення 10000 м², середньою щільністю руди 2,7 т/м³ та середнім вмістом корисного компонента 3%. Об'єм рудного тіла: $V = 10000 \text{ м}^2 \cdot 5 \text{ м} = 50000 \text{ м}^3$ Запаси руди: $P = 50000 \text{ м}^3 \cdot 2,7 \text{ т/м}^3 = 135000 \text{ т}$ Запаси корисного компонента: $Q = 135000 \text{ т} \cdot 0,03 = 4050 \text{ т}$

Сфера застосування

Застосовується для: • Простих за формою родовищ (пластових, лінзоподібних) • Родовищ з відносно рівномірним розподілом корисного компонента • Попередньої оцінки запасів на ранніх стадіях розвідки • Невеликих родовищ з обмеженою кількістю розвідувальних даних

Переваги

- Простота розрахунків і мінімальні затрати часу
- Швидкість обчислень і мінімальні вимоги до вихідних даних
- Доступність для розуміння та застосування без спеціального програмного забезпечення
- Можливість швидкої попередньої оцінки запасів

Недоліки

- Низька точність для родовищ складної форми
- Не враховує локальні зміни вмісту корисного компонента
- Значні похибки при нерівномірному розподілі корисного компонента
- Не враховує геологічні особливості родовища (розломи, фаціальні зміни)
- Висока залежність результату від репрезентативності вибірки проб

Модифікації методу: • Метод середньозваженого - враховує вагу кожного параметра відповідно до його значущості • Метод з урахуванням площі впливу - кожній пробі присвоюється різна вага в залежності від площі її впливу

Спосіб геологічних блоків

Спосіб геологічних блоків передбачає розбиття родовища на відносно однорідні блоки за геологічними ознаками, такими як: • Літологічний склад • Однорідність мінералізації • Умови залягання • Тектонічні порушення • Природні межі (розломи, контакти порід) • Ступінь вивченості Кожен блок розглядається як окреме геологічне тіло з власними параметрами (потужність, вміст корисного компонента, щільність).

Формули та алгоритм

1. Родовище розділяється на геологічно однорідні блоки на основі геологічних критеріїв та розвідувальних даних.
2. Для кожного блоку визначається площа в плані ($S_{\text{блоку}}$) за допомогою планіметра, координатної сітки або аналітичних методів.
3. Визначається середня потужність кожного блоку ($h_{\text{блоку}}$): $h_{\text{блоку}} = (h_1 + h_2 + \dots + h_n) / n$ де: h_1, h_2, \dots, h_n - потужності рудного тіла в точках опробування в межах блоку, n - кількість точок опробування в блоці. Або методом середньозваженого: $h_{\text{блоку}} = \sum(h_i \cdot l_i) / \sum l_i$ де: h_i - потужність рудного тіла в i -тій виробці, l_i - довжина інтервалу опробування
4. Обчислюється об'єм кожного блоку: $V_{\text{блоку}} = S_{\text{блоку}} \cdot h_{\text{блоку}}$
5. Визначається середня щільність руди в блоці ($d_{\text{блоку}}$): $d_{\text{блоку}} = (d_1 + d_2 + \dots + d_n) / n$ де: d_1, d_2, \dots, d_n - значення щільності в точках опробування, n - кількість вимірювань щільності в блоці
6. Визначається середній вміст корисного компонента в блоці ($c_{\text{блоку}}$): $c_{\text{блоку}} = \sum(c_i \cdot l_i) / \sum l_i$ де: c_i - вміст корисного компонента в i -тій пробі, l_i - довжина інтервалу опробування
7. Визначаються запаси корисного компонента в кожному блоці: $Q_{\text{блоку}} = V_{\text{блоку}} \cdot d_{\text{блоку}} \cdot c_{\text{блоку}}$
8. Загальні запаси родовища визначаються як сума запасів усіх блоків: $Q = \sum Q_{\text{блоку}}$

Детальний алгоритм застосування

1. Аналіз геологічної будови родовища та визначення критеріїв поділу на блоки.
2. Нанесення границь блоків на геологічні плани та розрізи.
3. Визначення площі кожного блоку в плані.
4. Розрахунок середньої потужності блоку за даними розвідувальних виробок.
5. Обчислення об'єму блоку.
6. Розрахунок середньої щільності та середнього вмісту корисного компонента в блоці.
7. Визначення запасів корисного компонента в блоці.
8. Сумування запасів всіх блоків та визначення загальних запасів родовища.

Приклад розрахунку

Родовище розділено на 3 геологічні блоки: Блок А: • Площа блоку: 5000 м² • Середня потужність: 4 м • Середня щільність: 2,8 т/м³ • Середній вміст корисного компонента: 4% Об'єм блоку А: $V_A = 5000 \text{ м}^2 \cdot 4 \text{ м} = 20000 \text{ м}^3$ Запаси руди в блоці А: $P_A = 20000 \text{ м}^3 \cdot 2,8 \text{ т/м}^3 = 56000 \text{ т}$ Запаси корисного компонента в блоці А: $Q_A = 56000 \text{ т} \cdot 0,04 = 2240 \text{ т}$

Блок Б: • Площа блоку: 7000 м² • Середня потужність: 3 м • Середня щільність: 2,6 т/м³ • Середній вміст корисного компонента: 3,5% Об'єм блоку Б: $V_B = 7000 \text{ м}^2 \cdot 3 \text{ м} = 21000 \text{ м}^3$ Запаси руди в блоці Б: $P_B = 21000 \text{ м}^3 \cdot 2,6 \text{ т/м}^3 = 54600 \text{ т}$ Запаси корисного компонента в блоці Б: $Q_B = 54600 \text{ т} \cdot 0,035 = 1911 \text{ т}$

Блок В: • Площа блоку: 3000 м² • Середня потужність: 5 м • Середня щільність: 2,9 т/м³ • Середній вміст корисного компонента: 2,8% Об'єм блоку В: $V_V = 3000 \text{ м}^2 \cdot 5 \text{ м} = 15000 \text{ м}^3$ Запаси руди в блоці В: $P_V = 15000 \text{ м}^3 \cdot 2,9 \text{ т/м}^3 = 43500 \text{ т}$ Запаси корисного компонента в блоці В: $Q_V = 43500 \text{ т} \cdot 0,028 = 1218 \text{ т}$

Загальні запаси корисного компонента: $Q = 2240 \text{ т} + 1911 \text{ т} + 1218 \text{ т} = 5369 \text{ т}$

Переваги

- Враховує геологічні особливості родовища (тектоніку, літологію, фації)
- Висока точність для родовищ з блоковою структурою
- Можливість диференційованої оцінки запасів різних категорій
- Можливість окремого розрахунку промислових та непромислових запасів
- Зручність для планування видобувних робіт
- Можливість урахування різної розвіданості окремих частин родовища

Недоліки

- Трудомісткість визначення границь блоків
- Суб'єктивність при визначенні геологічних границь
- Необхідність детального геологічного вивчення родовища
- Складність розрахунків при великій кількості блоків
- Можливі значні похибки при неправильному виділенні блоків

Модифікації методу: • Метод категорійних блоків - блоки виділяються за ступенем розвіданості та категоріями запасів • Метод експлуатаційних блоків - блоки виділяються з урахуванням майбутньої системи розробки • Метод підрахункових блоків - блоки виділяються за ознакою однорідності параметрів підрахунку

Спосіб експлуатаційних блоків

Спосіб експлуатаційних блоків передбачає розбиття родовища на блоки відповідно до планованої системи розробки та технології видобутку. На відміну від геологічних блоків, експлуатаційні блоки виділяються з урахуванням: • Технології видобутку • Порядку відпрацювання родовища • Планованих гірничих виробок • Технічних можливостей видобувного обладнання • Гірничотехнічних умов розробки • Організації виробничого процесу Цей метод тісно пов'язаний з проектуванням гірничодобувних робіт і часто використовується на діючих підприємствах.

Формули та алгоритм

- Родовище розділяється на експлуатаційні блоки відповідно до плану гірничих робіт та проекту розробки.
- Експлуатаційні блоки зазвичай визначаються: о Для підземної розробки - панелями, поверхами, камерами, стовпами о Для відкритої розробки - уступами, заходками, горизонтами
- Для кожного блоку визначається геометричні параметри (довжина, ширина, висота) та площа в плані ($S_{\text{блоку}}$).
- Визначається середня потужність кожного блоку ($h_{\text{блоку}}$) за даними детальної експлуатаційної розвідки: $h_{\text{блоку}} = \frac{\sum(h_i \cdot L_i)}{\sum L_i}$ де: h_i - потужність рудного тіла в i -тій точці опробування, L_i - довжина інтервалу опробування
- Обчислюється об'єм кожного експлуатаційного блоку: $V_{\text{блоку}} = S_{\text{блоку}} \cdot h_{\text{блоку}}$ або для складних форм: $V_{\text{блоку}} = L_{\text{блоку}} \cdot B_{\text{блоку}} \cdot H_{\text{блоку}} \cdot k_{\text{форми}}$ де: $L_{\text{блоку}}$, $B_{\text{блоку}}$, $H_{\text{блоку}}$ - відповідно довжина, ширина та висота блоку, $k_{\text{форми}}$ - коефіцієнт, що враховує відхилення форми блоку від паралелепіпеда
- Визначається середня щільність руди в блоці ($d_{\text{блоку}}$) за даними експлуатаційного опробування: $d_{\text{блоку}} = \frac{\sum(d_i \cdot V_i)}{\sum V_i}$ де: d_i - щільність руди в i -тій пробі, V_i - об'єм руди, що відповідає i -тій пробі
- Визначається середній вміст корисного компонента в блоці ($c_{\text{блоку}}$): $c_{\text{блоку}} = \frac{\sum(c_i \cdot m_i)}{\sum m_i}$ де: c_i - вміст корисного компонента в i -тій пробі, m_i - маса руди, що відповідає i -тій пробі
- Визначаються запаси корисного компонента в кожному блоці: $Q_{\text{блоку}} = V_{\text{блоку}} \cdot d_{\text{блоку}} \cdot c_{\text{блоку}}$
- Загальні запаси родовища визначаються як сума запасів усіх експлуатаційних блоків: $Q = \sum Q_{\text{блоку}}$

Детальний алгоритм застосування

- Розробка проекту гірничих робіт та визначення системи розробки родовища.
- Поділ родовища на експлуатаційні блоки відповідно до проекту.
- Проведення деталізаційної експлуатаційної розвідки в межах блоків.
- Визначення геометричних параметрів кожного блоку.
- Розрахунок об'єму блоку з урахуванням коефіцієнтів втрат та розубожування.
- Розрахунок середньої щільності та середнього вмісту корисного компонента в блоці за даними експлуатаційного опробування.
- Визначення запасів корисного компонента в блоці.
- Коригування параметрів блоку в процесі експлуатації на основі нових даних.
- Сумування запасів всіх експлуатаційних блоків та визначення загальних запасів родовища.

Приклад розрахунку

Родовище розробляється підземним способом і розділено на 2 експлуатаційні блоки (камери): Блок №1: • Розміри блоку: 50 м × 30 м × 10 м • Коефіцієнт форми: 0,9 • Середня щільність руди: 3,1 т/м³ • Середній вміст корисного компонента: 4,2% • Коефіцієнт втрат руди: 0,05 (5%) • Коефіцієнт розубожування: 0,08 (8%) Об'єм блоку №1: $V_1 = 50 \text{ м} \times 30 \text{ м} \times 10 \text{ м} \times 0,9 = 13500 \text{ м}^3$ Об'єм з урахуванням втрат: $V_{1\text{-нетто}} = 13500 \text{ м}^3 \times (1 - 0,05) = 12825 \text{ м}^3$ Запаси руди в блоці №1: $P_1 = 12825 \text{ м}^3 \times 3,1 \text{ т/м}^3 = 39757,5 \text{ т}$ Вміст з урахуванням розубожування: $c_{1\text{-нетто}} = 4,2\% \times (1 - 0,08) = 3,864\%$ Запаси корисного компонента в блоці №1: $Q_1 = 39757,5 \text{ т} \times 0,03864 = 1536 \text{ т}$

Блок №2: • Розміри блоку: 40 м × 35 м × 12 м • Коефіцієнт форми: 0,85 • Середня щільність руди: 2,9 т/м³ • Середній вміст корисного компонента: 3,8% • Коефіцієнт втрат руди: 0,07 (7%) • Коефіцієнт розубожування: 0,1 (10%) Об'єм блоку №2: $V_2 = 40 \text{ м} \times 35 \text{ м} \times 12 \text{ м} \times 0,85 = 14280 \text{ м}^3$ Об'єм з урахуванням втрат: $V_{2\text{-нетто}} = 14280 \text{ м}^3 \times (1 - 0,07) = 13280,4 \text{ м}^3$ Запаси руди в блоці №2: $P_2 = 13280,4 \text{ м}^3 \times 2,9 \text{ т/м}^3 = 38513,16 \text{ т}$ Вміст з урахуванням розубожування: $c_{2\text{-нетто}} = 3,8\% \times (1 - 0,1) = 3,42\%$ Запаси корисного компонента в блоці №2: $Q_2 = 38513,16 \text{ т} \times 0,0342 = 1317,15 \text{ т}$

Загальні запаси корисного компонента: $Q = 1536 \text{ т} + 1317,15 \text{ т} = 2853,15 \text{ т}$

Переваги

- Пряма прив'язка до плану гірничих робіт
- Зручність для оперативного планування видобутку
- Можливість враховувати технологічні особливості видобутку
- Урахування коефіцієнтів втрат та розубожування
- Можливість коригування параметрів у процесі експлуатації
- Висока оперативність оцінки запасів
- Зручність для економічної оцінки ефективності розробки

Недоліки

- Необхідність детальної розвідки родовища
- Може не відповідати геологічним особливостям родовища
- Можливість зміни проекту розробки, що вимагає перерахунку запасів
- Суб'єктивність при виборі розмірів та форми експлуатаційних блоків
- Не завжди враховує природні границі рудних тіл
- Потребує постійного коригування в процесі експлуатації

Модифікації методу: • Метод видобувних блоків - враховує фактичні параметри видобутку • Метод технологічних блоків - враховує технологічні особливості переробки руди • Метод календарного планування - блоки виділяються за часом їх відпрацювання ного тіла на кожному розрізі (S_1, S_2, \dots, S_n) 2. Визначення об'єму між сусідніми розрізами: $V_{12} = (S_1 + S_2) / 2 \cdot L_{12}$ де L_{12} - відстань між розрізами 1. Загальний об'єм: $V = \sum V_{\text{між розрізами}}$ 1. Запаси корисного компонента: $Q = V \cdot d \cdot c$ Сфера застосування Застосовується для родовищ пластової, лінзоподібної форми, а також для жильних родовищ. Переваги та недоліки Переваги: • Враховує зміни форми рудного тіла • Наочність підрахунку Недоліки: • Значні похибки при великих відстанях між розрізами • Трудомісткість побудови якісних розрізів

Спосіб багатокутників

Спосіб багатокутників (також відомий як метод полігонів або метод Болдирєва) полягає в розбитті площі родовища на окремі ділянки (багатокутники або полігони) навколо кожної розвідувальної точки (свердловини, шурфу, канами). Границі багатокутників проводяться по середині відстані між сусідніми розвідувальними точками або ж на рівній відстані від трьох і більше найближчих точок. Кожний багатокутник характеризується параметрами, визначеними у відповідній точці опробування (потужність, вміст, щільність). Цей метод особливо ефективний для родовищ зі складною морфологією та нерівномірним розподілом корисного компонента, а також при нерегулярній мережі розвідувальних виробок.

Формули та алгоритм

- Навколо кожної точки опробування (свердловини, шурфу) будується багатокутник впливу. Границі багатокутників проводяться: о По середині відстані між сусідніми точками опробування о Або по перпендикулярах, проведених до середини ліній, що з'єднують сусідні точки о Або методом діаграм Вороного (полігонів Тіссена)
- Визначається площа кожного багатокутника (S_i) за допомогою планіметра, палетки або аналітичних методів: $S_i = f(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n)$ де: $x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n$ - координати вершин багатокутника Або за формулою Гаусса для площі многокутника: $S_i = 0.5 \cdot |\sum(x_{j-1} \cdot y_{j+1} - x_{j+1} \cdot y_{j-1})|$ де: x_j, y_j - координати j -тої вершини багатокутника, x_{j+1}, y_{j+1} - координати наступної вершини
- Визначається потужність рудного тіла (h_i) в кожній точці опробування.
- Обчислюється об'єм для кожного багатокутника: $V_i = S_i \cdot h_i$ де: S_i - площа i -того багатокутника, h_i - потужність рудного тіла в i -тій точці опробування
- Визначається щільність руди (d_i) та вміст корисного компонента (c_i) для кожної точки опробування.
- Розраховуються запаси руди (P_i) та корисного компонента (Q_i) в межах кожного багатокутника: $P_i = V_i \cdot d_i$ $Q_i = P_i \cdot c_i = V_i \cdot d_i \cdot c_i$
- Загальні запаси руди та корисного компонента визначаються як сума запасів всіх багатокутників: $P = \sum P_i$ $Q = \sum Q_i$

Детальний алгоритм застосування

- Нанесення на план родовища всіх розвідувальних виробок з позначенням потужності рудного тіла, вмісту корисного компонента та щільності руди.
- Побудова багатокутників впливу навколо кожної розвідувальної точки.
- Визначення площі кожного багатокутника.
- Розрахунок об'єму рудного тіла в межах кожного багатокутника.
- Визначення запасів руди та корисного компонента для кожного багатокутника.
- Сумування запасів всіх багатокутників та визначення загальних запасів родовища.
- Оцінка похибки підрахунку та визначення категорії запасів.

Приклад розрахунку

На ділянці родовища виділено 3 багатокутники навколо розвідувальних свердловин: Багатокутник №1: • Площа: 2500 м² • Потужність рудного тіла: 3,5 м • Щільність руди: 2,8 т/м³ • Вміст корисного компонента: 4,2% Об'єм руди в багатокутнику №1: $V_1 = 2500 \text{ м}^2 \times 3,5 \text{ м} = 8750 \text{ м}^3$ Запаси руди: $P_1 = 8750 \text{ м}^3 \times 2,8 \text{ т/м}^3 = 24500 \text{ т}$ Запаси корисного компонента: $Q_1 = 24500 \text{ т} \times 0,042 = 1029 \text{ т}$

Багатокутник №2: • Площа: 3200 м² • Потужність рудного тіла: 4,2 м • Щільність руди: 2,9 т/м³ • Вміст корисного компонента: 3,8% Об'єм руди в багатокутнику №2: $V_2 = 3200 \text{ м}^2 \times 4,2 \text{ м} = 13440 \text{ м}^3$ Запаси руди: $P_2 = 13440 \text{ м}^3 \times 2,9 \text{ т/м}^3 = 38976 \text{ т}$ Запаси корисного компонента: $Q_2 = 38976 \text{ т} \times 0,038 = 1481,1 \text{ т}$

Багатокутник №3: • Площа: 1800 м² • Потужність рудного тіла: 2,8 м • Щільність руди: 3,0 т/м³ • Вміст корисного компонента: 3,5% Об'єм руди в багатокутнику №3: $V_3 = 1800 \text{ м}^2 \times 2,8 \text{ м} = 5040 \text{ м}^3$ Запаси руди: $P_3 = 5040 \text{ м}^3 \times 3,0 \text{ т/м}^3 = 15120 \text{ т}$ Запаси корисного компонента: $Q_3 = 15120 \text{ т} \times 0,035 = 529,2 \text{ т}$

Загальні запаси руди: $P = 24500 \text{ т} + 38976 \text{ т} + 15120 \text{ т} = 78596 \text{ т}$ Загальні запаси корисного компонента: $Q = 1029 \text{ т} + 1481,1 \text{ т} + 529,2 \text{ т} = 3039,3 \text{ т}$

Переваги

- Враховує локальні особливості розподілу корисного компонента
- Добре відображає нерівномірність розподілу запасів
- Підвищена точність для родовищ з нерівномірним розподілом параметрів
- Можливість застосування при неправильній мережі розвідувальних виробок
- Можливість диференційованої оцінки запасів різних категорій
- Врахування зони впливу кожної розвідувальної виробки
- Наочність представлення результатів

Недоліки

- Суб'єктивність у визначенні границь багатокутників
- Трудомісткість побудови багатокутників та розрахунків
- Недостатнє врахування геологічних особливостей родовища
- Необхідність великої кількості розвідувальних виробок
- Складність застосування при різко змінній потужності рудних тіл
- Обмеженість застосування для крутопадаючих рудних тіл
- Складність урахування виклинювання рудних тіл

Модифікації методу: • Метод середніх взважених дистанцій - врахування відстані від оцінюваної точки до точок опробування • Метод обернених квадратів відстаней - надання більшої ваги близьким точкам опробування • Метод звужених багатокутників - урахування виклинювання рудних тіл • Метод багатокутників з поправкою на потужність - додаткове врахування зміни потужності

Спосіб трикутників

Спосіб трикутників (або метод триангуляції) є різновидом способу багатокутників, де в якості елементарних підрахункових фігур використовуються трикутники. Територія родовища розбивається на систему трикутників, вершинами яких є точки опробування (свердловини, шурфи). Зазвичай використовується триангуляція Делоне, при якій сума кутів всіх трикутників є мінімальною, а самі трикутники максимально наближені до рівносторонніх. Цей метод забезпечує більшу об'єктивність порівняно зі способом багатокутників, оскільки побудова трикутників менш суб'єктивна. Метод широко застосовується для родовищ з нерівномірною мережею розвідувальних виробок.

Формули та алгоритм

1. Точки опробування з'єднуються лініями, утворюючи мережу трикутників. Зазвичай використовується алгоритм триангуляції Делоне, при якому кожен трикутник задовольняє умову, що всередині описаного навколо нього кола немає інших точок опробування.
2. Визначається площа кожного трикутника (S_i) за формулою Герона: $S_i = \sqrt{p \cdot (p - a) \cdot (p - b) \cdot (p - c)}$ де: a, b, c - сторони трикутника, $p = (a + b + c) / 2$ - півпериметр трикутника Або за координатами вершин: $S_i = 0.5 \cdot |(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)|$ де: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ - координати вершин трикутника
3. Обчислюється середня потужність рудного тіла в межах трикутника: $h_i = (h_1 + h_2 + h_3) / 3$ де: h_1, h_2, h_3 - потужність рудного тіла у вершинах трикутника Або з використанням методу зважування: $h_i = (h_1 \cdot S_1 + h_2 \cdot S_2 + h_3 \cdot S_3) / (S_1 + S_2 + S_3)$ де: S_1, S_2, S_3 - площі допоміжних трикутників або інші ваги
4. Обчислюється об'єм для кожного трикутника: $V_i = S_i \cdot h_i$
5. Обчислюється середня щільність руди в межах трикутника: $d_i = (d_1 + d_2 + d_3) / 3$ де: d_1, d_2, d_3 - щільність руди у вершинах трикутника
6. Визначається середній вміст корисного компонента в межах трикутника: $c_i = (c_1 + c_2 + c_3) / 3$ де: c_1, c_2, c_3 - вміст корисного компонента у вершинах трикутника Або методом зважування за потужністю: $c_i = (c_1 \cdot h_1 + c_2 \cdot h_2 + c_3 \cdot h_3) / (h_1 + h_2 + h_3)$
7. Розраховуються запаси руди та корисного компонента в межах кожного трикутника: $P_i = V_i \cdot d_i$ $Q_i = P_i \cdot c_i = V_i \cdot d_i \cdot c_i$
8. Загальні запаси руди та корисного компонента визначаються як сума запасів всіх трикутників: $P = \sum P_i$ $Q = \sum Q_i$

Детальний алгоритм застосування

1. Нанесення на план родовища всіх розвідувальних виробок з позначенням потужності рудного тіла, вмісту корисного компонента та щільності руди.
2. Побудова системи трикутників, що з'єднують сусідні точки опробування (бажано за алгоритмом Делоне).
3. Визначення площі кожного трикутника.
4. Обчислення середньої потужності, щільності та вмісту корисного компонента для кожного трикутника.
5. Розрахунок об'єму рудного тіла та запасів руди в межах кожного трикутника.
6. Обчислення запасів корисного компонента для кожного трикутника.
7. Сумування запасів всіх трикутників та визначення загальних запасів родовища.
8. Оцінка похибки підрахунку та визначення категорії запасів.

Приклад розрахунку

На ділянці родовища виділено 2 трикутники, утворені точками опробування (свердловинами): Трикутник №1: • Площа: 1800 м² • Потужність рудного тіла у вершинах: $h_1 = 4,2$ м, $h_2 = 3,8$ м, $h_3 = 4,5$ м • Щільність руди у вершинах: $d_1 = 2,7$ т/м³, $d_2 = 2,8$ т/м³, $d_3 = 2,9$ т/м³ • Вміст корисного компонента у вершинах: $c_1 = 3,2\%$, $c_2 = 3,5\%$, $c_3 = 3,0\%$ Середня потужність: $h_1 = (4,2 + 3,8 + 4,5) / 3 = 4,17$ м Середня щільність: $d_1 = (2,7 + 2,8 + 2,9) / 3 = 2,8$ т/м³ Середній вміст: $c_1 = (3,2 + 3,5 + 3,0) / 3 = 3,23\%$ Об'єм руди: $V_1 = 1800$ м² × 4,17 м = 7506 м³ Запаси руди: $P_1 = 7506$ м³ × 2,8 т/м³ = 21016,8 т Запаси корисного компонента: $Q_1 = 21016,8$ т × 0,0323 = 678,8 т

Трикутник №2: • Площа: 2200 м² • Потужність рудного тіла у вершинах: $h_1 = 3,6$ м, $h_2 = 4,0$ м, $h_3 = 3,9$ м • Щільність руди у вершинах: $d_1 = 2,6$ т/м³, $d_2 = 2,7$ т/м³, $d_3 = 2,8$ т/м³ • Вміст корисного компонента у вершинах: $c_1 = 2,8\%$, $c_2 = 3,0\%$, $c_3 = 3,2\%$ Середня потужність: $h_2 = (3,6 + 4,0 + 3,9) / 3 = 3,83$ м Середня щільність: $d_2 = (2,6 + 2,7 + 2,8) / 3 = 2,7$ т/м³ Середній вміст: $c_2 = (2,8 + 3,0 + 3,2) / 3 = 3,0\%$ Об'єм руди: $V_2 = 2200$ м² × 3,83 м = 8426 м³ Запаси руди: $P_2 = 8426$ м³ × 2,7 т/м³ = 22750,2 т Запаси корисного компонента: $Q_2 = 22750,2$ т × 0,03 = 682,5 т

Загальні запаси руди: $P = 21016,8$ т + 22750,2 т = 43767 т Загальні запаси корисного компонента: $Q = 678,8$ т + 682,5 т = 1361,3 т

Переваги

- Менша суб'єктивність порівняно зі способом багатокутників
- Простіша геометрична побудова
- Можливість автоматизації побудови трикутників за допомогою алгоритмів триангуляції
- Висока точність для рівномірно розвіданих родовищ
- Можливість застосування при нерегулярній мережі розвідувальних виробок
- Зручність для комп'ютерної обробки даних
- Можливість візуалізації розподілу параметрів родовища
- Відносно низька трудомісткість порівняно з іншими методами подібної точності

Недоліки

- Похибки при значній нерівномірності розташування точок опробування
- Не враховує геологічні границі
- Труднощі при врахуванні виклинювання рудних тіл
- Обмеженість застосування для крутопадаючих жильних родовищ
- Необхідність достатньої кількості точок опробування
- Складність урахування структурних особливостей родовища
- Можливі значні похибки при різкій зміні параметрів між точками опробування

Модифікації методу: • Метод зважених трикутників - врахування ваги кожної точки опробування • Метод неоднорідних трикутників - використання додаткових точок з інтерпольованими значеннями • Метод анізотропних трикутників - врахування напрямків максимальної і мінімальної мінливості параметрів • Метод об'ємної триангуляції - побудова тетраєдрів для тривимірного моделювання

Спосіб об'ємної палетки П.К. Соболевського

Спосіб об'ємної палетки, розроблений академіком П.К. Соболевським, є одним із найточніших графоаналітичних методів підрахунку запасів. Він базується на використанні спеціальної сітки (палетки) з рівномірними осередками, яка накладається на план або розріз родовища. У кожному вузлі сітки визначається потужність рудного тіла, а об'єм розраховується як сума елементарних об'ємів між вузлами. Метод особливо ефективний для родовищ складної форми, де інші методи дають значні похибки. Він поєднує графічні та аналітичні методи обчислень і забезпечує високу точність підрахунку.

Формули та алгоритм

- На план родовища наноситься рівномірна прямокутна або квадратна сітка з кроком a (палетка). Крок сітки обирається в залежності від складності родовища і потрібної точності підрахунку (зазвичай від 5 до 50 м).
- У кожному вузлі сітки, який потрапляє в контур рудного тіла, визначається потужність рудного тіла (h_i) за даними розвідки або інтерполяції/екстраполяції.
- Об'єм рудного тіла обчислюється за формулою П.К. Соболевського: $V = a^2 \cdot \sum h_i$ де: a - крок сітки палетки, h_i - потужність рудного тіла у вузлах сітки, $\sum h_i$ - сума потужностей у всіх вузлах сітки Для вузлів, що потрапляють на контур рудного тіла, вводяться коефіцієнти: 0,5 - для вузлів на прямолінійному відрізку контуру, 0,75 - для вузлів у випуклому куті контуру, 0,25 - для вузлів у ввігнутому куті контуру
- Для кожного вузла сітки визначається вміст корисного компонента (c_i) та щільність руди (d_i) за даними опробування або інтерполяції.
- Запаси руди обчислюються за формулою: $P = a^2 \cdot \sum (h_i \cdot d_i)$ де: d_i - щільність руди у вузлах сітки
- Запаси корисного компонента обчислюються за формулою: $Q = a^2 \cdot \sum (h_i \cdot d_i \cdot c_i)$ де: c_i - вміст корисного компонента у вузлах сітки

Детальний алгоритм застосування

- Побудова детального плану родовища з нанесенням контурів рудного тіла.
- Вибір кроку палетки в залежності від складності форми родовища та розміру рудного тіла.
- Накладання палетки на план родовища.
- Визначення потужності рудного тіла в кожному вузлі палетки.
- Визначення щільності руди та вмісту корисного компонента в кожному вузлі.
- Підсумовування потужностей з урахуванням коефіцієнтів для граничних вузлів.
- Розрахунок об'єму рудного тіла за формулою Соболевського.
- Розрахунок запасів руди та корисного компонента.
- Оцінка похибки підрахунку та визначення категорії запасів.

Приклад розрахунку

На план родовища накладена палетка з кроком 10 м. У межах контуру рудного тіла виявлено: • 18 внутрішніх вузлів з сумарною потужністю $\sum h_{\text{внутр}} = 72 \text{ м} \cdot 12$ вузлів на границі з сумарною потужністю $\sum h_{\text{гран}} = 36 \text{ м}$ (з урахуванням коефіцієнта 0,5) • 2 вузли у випуклих кутах з сумарною потужністю $\sum h_{\text{випукл}} = 8 \text{ м}$ (з урахуванням коефіцієнта 0,75) • 1 вузол у ввігнутому куті з потужністю $h_{\text{ввігн}} = 3 \text{ м}$ (з урахуванням коефіцієнта 0,25) Загальна сума потужностей: $\sum h_i = 72 + 36 + 8 + 3 = 119 \text{ м}$ Об'єм рудного тіла: $V = 10^2 \cdot 119 = 11900 \text{ м}^3$ Середня щільність руди: $d = 2,8 \text{ т/м}^3$ Середній вміст корисного компонента: $c = 3,5\%$ Запаси руди: $P = 11900 \text{ м}^3 \cdot 2,8 \text{ т/м}^3 = 33320 \text{ т}$ Запаси корисного компонента: $Q = 33320 \text{ т} \cdot 0,035 = 1166,2 \text{ т}$

Переваги

- Висока точність для родовищ складної форми
- Об'єктивність підрахунку
- Можливість урахування локальних особливостей родовища
- Хороші результати при нерівномірному розподілі корисного компонента
- Можливість автоматизації розрахунків
- Застосовність практично для будь-яких типів родовищ
- Зручність для комп'ютерного моделювання
- Можливість тривимірної візуалізації розподілу параметрів

Недоліки

- Трудомісткість розрахунків
- Необхідність детальних геологічних матеріалів
- Складність визначення потужності у вузлах сітки без достатніх даних
- Необхідність інтерполяції/екстраполяції для вузлів без фактичних даних
- Залежність точності від вибору кроку палетки
- Значний обсяг обчислювальних робіт
- Потреба у спеціальному програмному забезпеченні для автоматизації

Модифікації методу: • Метод об'ємної палетки змінного кроку - крок сітки змінюється в залежності від складності ділянки • Метод тривимірної палетки - використання тривимірної сітки для підрахунку запасів • Метод зважених вузлів - введення вагових коефіцієнтів для вузлів сітки • Метод адаптивної палетки - автоматичне коригування кроку сітки в процесі підрахунку

Сучасні реалізації методу В сучасній практиці метод об'ємної палетки П.К. Соболевського реалізується у вигляді комп'ютерних алгоритмів і є основою для багатьох програм моделювання родовищ. Використання ГІС-технологій і тривимірного моделювання дозволяє автоматизувати процес підрахунку і значно підвищити його точність. Сучасні модифікації включають: 1. Метод крігінгу - геостатистичний метод інтерполяції параметрів між точками опробування 1. Метод скінченних елементів - розбиття родовища на елементарні об'єми з подальшим їх підсумовуванням 1. Метод блокового моделювання - побудова тривимірної блокової моделі родовища з присвоєнням кожному блоку значень вмісту і щільності 1. Метод воксельного моделювання - використання тривимірних воксельних (об'ємних) моделей для детального відображення структури родовища

Метод	Точність	Трудомісткість	Оптимальні умови застосування
Середнього арифметичного	Низька	Низька	Прості за формою родовища, рівномірний розподіл корисного компонента
Геологічних блоків	Висока	Висока	Родовища з чіткою блоковою структурою
Експлуатаційних блоків	Середня	Середня	Діючі родовища, оперативний підрахунок запасів
Розрізів	Висока	Висока	Пластові, жильні родовища
Багатокутників	Середня	Висока	Родовища з нерівномірним розподілом корисного компонента
Трикутників	Середня	Середня	Пластоподібні поклади, рівномірна мережа розвідки
Об'ємної палетки	Висока	Дуже висока	Родовища складної форми з детальною розвідкою

Практичні рекомендації та висновки

1. Для простих пластових родовищ з витриманою потужністю та рівномірним розподілом корисного компонента доцільно застосовувати спосіб середнього арифметичного або спосіб розрізів.
2. Для родовищ складної форми з нерівномірним розподілом корисного компонента рекомендується застосовувати спосіб геологічних блоків, спосіб багатокутників або спосіб об'ємної палетки П.К. Соболевського.
3. На стадії експлуатаційної розвідки найбільш доцільним є застосування способу експлуатаційних блоків.
4. Для підвищення точності підрахунку рекомендується застосовувати кілька методів з подальшим порівнянням отриманих результатів.

Висновки

Вибір методу підрахунку запасів залежить від геологічних особливостей родовища, стадії його вивчення, наявної інформації та необхідної точності підрахунку. Кожен метод має свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при плануванні геологорозвідувальних робіт та виборі методики підрахунку запасів. Сучасні технології, такі як геоінформаційні системи (ГІС) та тривимірне моделювання, дозволяють значно підвищити точність підрахунку запасів та автоматизувати цей процес. Однак, розуміння класичних методів підрахунку запасів залишається необхідною умовою для правильної інтерпретації результатів та оцінки їх достовірності.

Література

1. Соболевський П.К. Сучасна гірнича геометрія. - М.: Надра, 1969.
2. Букринський В.А. Геометрія надр. - М.: Надра, 1985.
3. Каждан А.Б. Розвідка родовищ корисних копалин. - М.: Надра, 1977.
4. Подсчет запасов месторождений полезных ископаемых / Под ред. В.И. Смирнова и А.П. Прокофьева. - М.: Недр, 1981.
5. Інструкція з застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ металічних корисних копалин. - К.: ДКЗ України, 2002.

