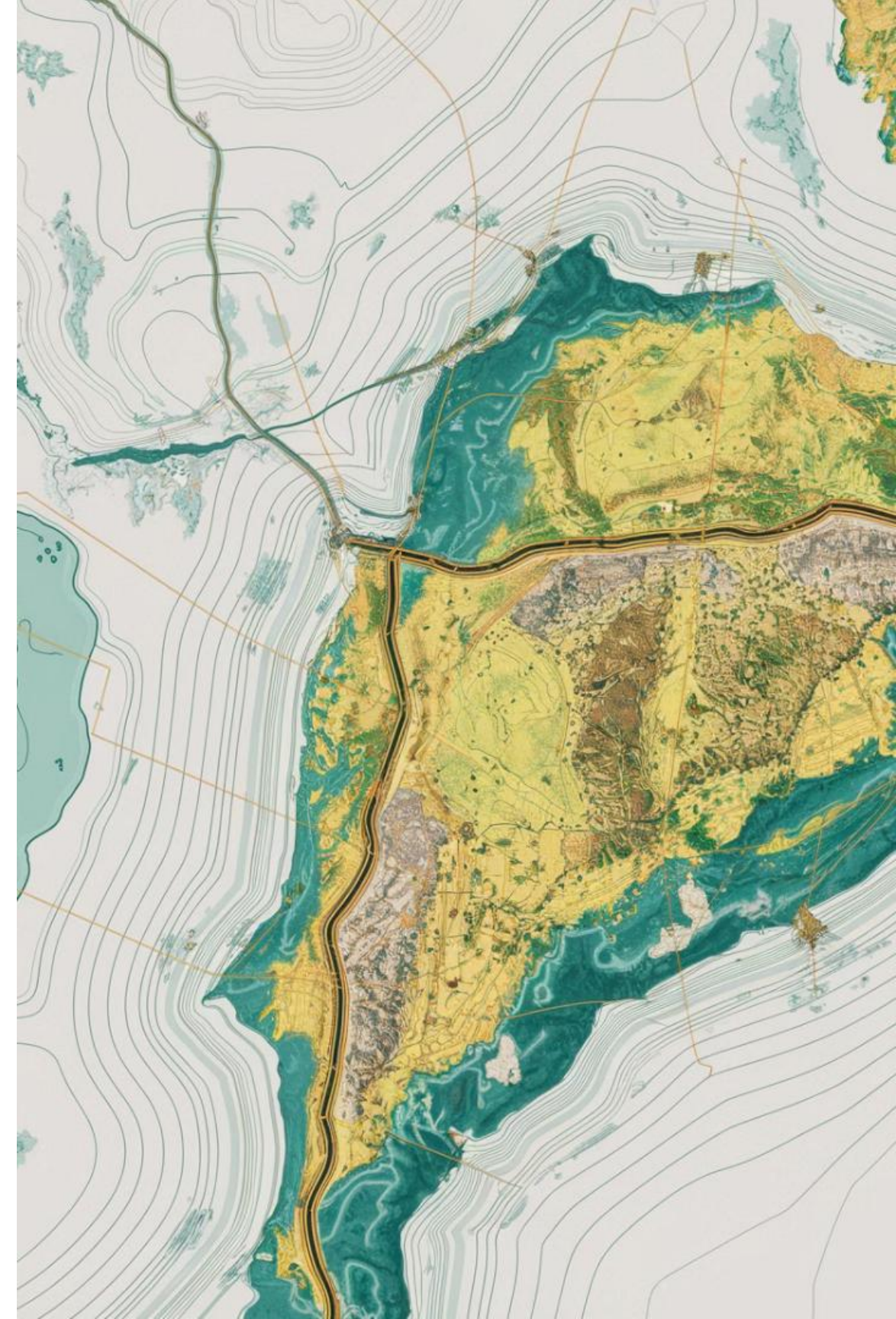


# Методи визначення площі контурів запасів корисних копалин

Методи визначення площі контурів запасів корисних копалин – це сукупність спеціалізованих підходів для розрахунку просторових параметрів родовищ. Вони включають: графічний метод (нанесення на міліметровий папір), аналітичний метод (використання координат точок контуру), планіметричний метод (вимірювання механічним планіметром), цифровий ГІС-метод (опрацювання даних у спеціалізованому програмному забезпеченні), фотограмметричний метод (використання аерофотознімків), лазерне сканування та дрон-знімання (створення точних 3D-моделей), а також геостатистичний метод (стохастичне моделювання просторових змінних). Вибір методу залежить від необхідної точності, доступного обладнання, масштабу родовища та економічних міркувань.





# Графічний метод

## 1 Суть методу

Визначення площі шляхом нанесення контурів запасів на міліметровий папір у відповідному масштабі. Контур розбивається на прості геометричні фігури (трикутники, трапеції, прямокутники) з подальшим підрахунком кількості квадратів міліметрового паперу.

## 2 Застосування

Використовується для попередньої оцінки запасів родовищ корисних копалин. Застосовується під час аналізу топографічних карт масштабу 1:1000-1:10000 та геологічних схем. Ефективний для родовищ з відносно простою формою контурів.

## 3 Переваги

Простий у використанні без спеціалізованих знань. Не потребує спеціального обладнання крім креслярських інструментів (транспортир, лінійка, планшет). Швидкий для отримання попередніх результатів у польових умовах.

## 4 Недоліки

Точність обмежена до 2-5% залежно від складності контуру. Суттєво залежить від масштабу карти та товщини ліній контуру. Трудомісткий при великих площах і багат шарових родовищах. Високий рівень суб'єктивної похибки оператора.





# Практичне застосування графічного методу

## Підготовка топографічної основи

Геолог використовує топографічну карту масштабу 1:1000-1:10000 з нанесеними геологічними контурами родовища та чітко позначеними границями балансових і забалансових запасів корисних копалин.

## Триангуляція контуру

Контур розбивається на прості геометричні фігури (переважно трикутники, трапеції та прямокутники) з урахуванням мінімізації похибки апроксимації складної форми родовища.

## Виконання вимірювань

За допомогою лінійки або транспортира вимірюються основи, висоти та діагоналі кожної фігури з точністю до 0,5 мм. Для підвищення точності застосовується міліметровий папір для підрахунку кількості квадратів.

## Математичні розрахунки

Розраховується площа кожної фігури за відповідними формулами ( $S = \frac{1}{2}ah$  для трикутників,  $S = \frac{1}{2}(a+c)h$  для трапецій), результати сумуються та переводяться з масштабу карти в реальні площі ( $m^2$  або га) з урахуванням коефіцієнта масштабування.





# Аналітичний метод

## Суть методу

Обчислення площі контуру за координатами вершин многокутника, що описує контур родовища. Використовується формула Гаусса (або формула шнурового множення):  $S = \frac{1}{2} |\sum (x_i(y_{i+1} - y_{i-1}))|$ , де  $x_i, y_i$  — координати  $i$ -ї вершини многокутника в прямокутній системі координат.

## Переваги

Висока точність до 0,1-0,5% при коректному визначенні координат. Повна автоматизація розрахунків у спеціалізованому ПЗ. Можливість інтеграції з ГІС-системами та базами даних геологорозвідувальних робіт. Відсутність систематичних похибок, які характерні для графічного методу.

## Застосування

Широко застосовується в маркшейдерії, геологічному картуванні, проектуванні гірничих виробок та бурових свердловин. Особливо ефективний при складних формах родовищ, коли необхідне точне визначення площі для підрахунку запасів категорій А, В і С1.

## Недоліки

Вимагає точного визначення координат кожної вершини контуру (похибка не більше  $\pm 0,5$  мм у масштабі плану). Трудомісткий при ручних обчисленнях для контурів з великою кількістю вершин ( $>10$ ). Необхідність спеціальної підготовки персоналу та використання координатографів або дигітайзерів для введення даних.

# Математичні формули аналітичного методу

## Метод Гауса

Базується на формулі:  $S = 1/2 |\sum(x_1y_2 - x_2y_1 + x_2y_3 - x_3y_2 + \dots + x_ny_1 - x_1y_n)|$ , де  $(x_i, y_i)$  — координати вершин. Забезпечує точність до 0,2% при підрахунку запасів категорій А і В. Використовується для складних геометричних форм родовищ кольорових металів.

У сучасній практиці метод Гауса використовується при геоінформаційному моделюванні родовищ золота, міді, нікелю та інших кольорових металів. Зокрема, на родовищах Криворіжського залізорудного басейну цей метод дозволив уточнити запаси на 3-5% порівняно з графічними методами оцінки.

## Метод трикутників

Розрахунок за формулою:  $S = \sum(1/2 \cdot |x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)|)$ . Оптимальний для родовищ неправильної форми з розломами. Застосовується при блоковому підрахунку запасів з точністю до 0,3% для категорії С1. Потребує мінімум 3 свердловини для формування трикутника.

На практиці метод трикутників часто комбінують з геостатистичним аналізом для родовищ рідкісних металів та діамантів. При розробці Мужіївського золото-поліметалічного родовища (Закарпаття) застосування методу трикутників дозволило виділити додаткові рудні тіла, що збільшило загальні запаси на 12%. Сучасні програмні комплекси (Micromine, Surpac) автоматизують процес тріангуляції, що значно скорочує час на обчислення.

## Метод трапецій

Використовує формулу:  $S = \sum(h_i \cdot (a_1 + a_2)/2)$ , де  $h_i$  — висота,  $a_1, a_2$  — основи трапеції. Ефективний для пластових родовищ з витриманою потужністю. Застосовується для підрахунку запасів вугілля та залізних руд з точністю 0,1-0,4%. Інтегрується з даними геологічного опробування.

У сучасних умовах метод трапецій широко використовується при підрахунку запасів горизонтальних та пологозалягаючих родовищ нафти, газу, бурого вугілля. При розробці Львівсько-Волинського вугільного басейну метод трапецій дозволив оптимізувати розміщення видобувних штреків завдяки точному визначенню границь продуктивних ділянок. Метод також ефективний для оперативного підрахунку залишкових запасів у процесі експлуатації родовища, коли необхідно швидко оцінити залишковий потенціал гірничих блоків.



# Планіметричний метод



## Суть методу

Визначення площі шляхом обведення контуру запасів механічним або електронним планіметром. Прилад фіксує переміщення вимірювального колеса та перетворює дані у площу з урахуванням масштабу карти (1:1000, 1:2000 та ін.).



## Застосування

Широко використовується при роботі з геологічними картами родовищ вугілля та руд Донбасу та Кривбасу. Ефективний для польових вимірювань при експлуатаційній розвідці та для оперативного підрахунку запасів на діючих гірничих підприємствах.



## Недоліки

Похибка зростає до 1-2% при роботі з деформованими картами. Вимагає повторних вимірювань для контролю (не менше 3 разів). Низька ефективність для дуже великих родовищ з площею понад 10 км<sup>2</sup> через накопичення похибки.



## Переваги

Досягає точності 0,2-0,5% при кваліфікованій роботі з планіметром. Не потребує комп'ютерної обробки даних. Економічно ефективний для середніх за розміром родовищ із складною конфігурацією контурів.



# Робота з планіметром

1

## Підготовка інструмента

Закріплення геологічної карти на гладкій дерев'яній поверхні за допомогою кнопок. Калібрування полярного планіметра за еталонною площею (зазвичай 100 см<sup>2</sup>) та встановлення постійного коефіцієнта приладу.

2

## Встановлення нульової точки

Розташування полюса планіметра за межами вимірюваного контуру на відстані 10-15 см. Встановлення вимірювального наконечника в початкову точку та запис початкових показників лічильника (зазвичай з точністю до 0,001 одиниці виміру).

3

## Техніка обведення контуру

Рівномірне обведення контуру родовища зі швидкістю 2-3 см/сек, дотримуючись лінії з точністю  $\pm 0,2$  мм. Обов'язкове повернення в початкову точку з похибкою не більше 0,5 мм для замикання контуру.

4

## Розрахунок площі

Фіксація різниці між кінцевими та початковими показниками лічильника. Множення отриманого значення на коефіцієнт приладу та квадрат масштабу карти (для карт 1:2000 - коефіцієнт 4, для 1:5000 - коефіцієнт 25). Проведення контрольних вимірювань тричі з розрахунком середнього значення.



# Цифровий (ГІС) метод



Цифровий метод став основним у сучасних гірничо-геологічних проєктах завдяки високій точності та швидкості обробки даних. ГІС дозволяє не лише визначати площі контурів родовищ, але й створювати тривимірні моделі для підрахунку запасів корисних копалин об'ємним методом. Точність методу становить  $\pm 0,5-1\%$  за умови коректного введення вихідних даних. Інтеграція з GPS/GNSS системами дозволяє оновлювати дані в режимі реального часу, що особливо важливо для активних гірничих робіт.





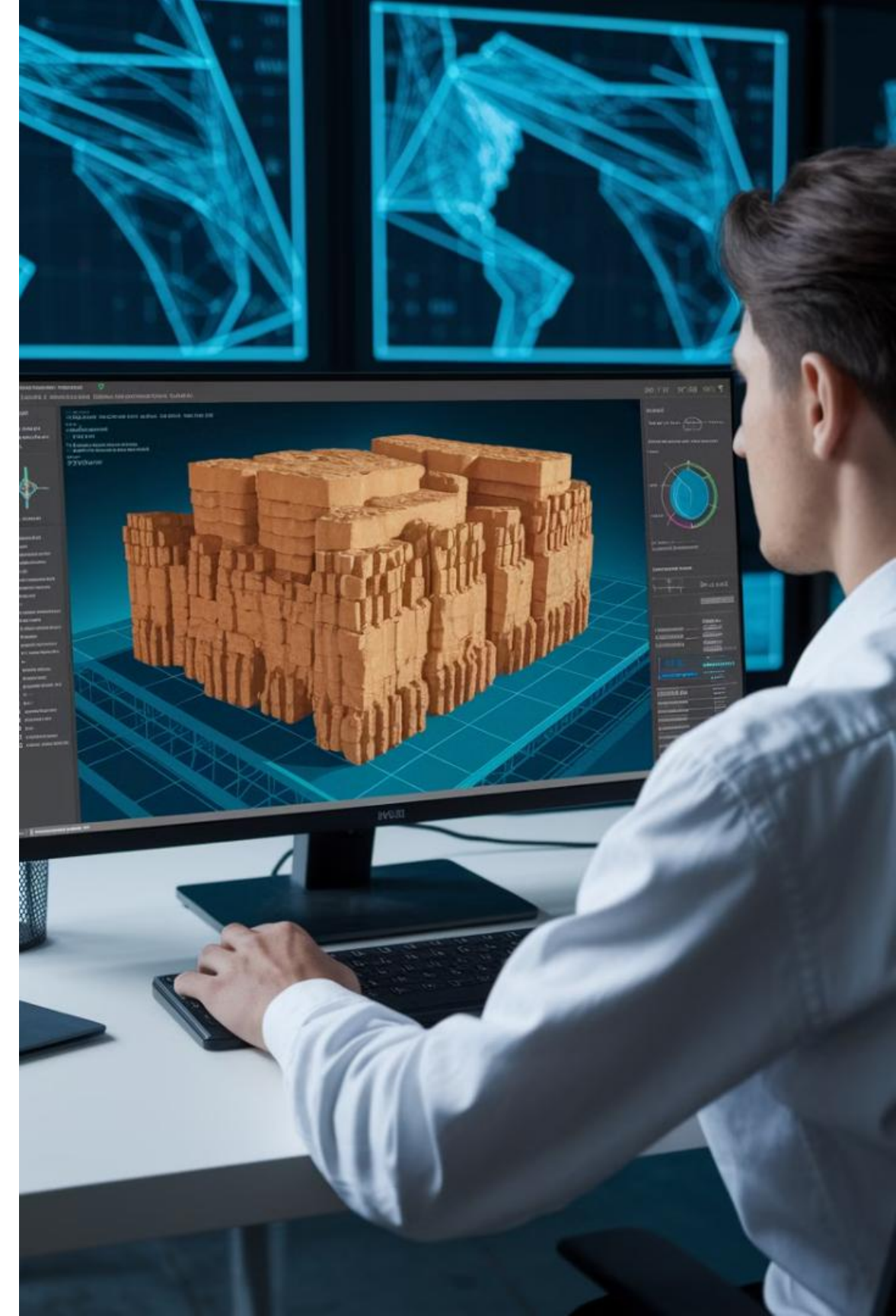
# Переваги та недоліки ГІС-методу

## Переваги

- Висока точність розрахунків (похибка  $\pm 0,5-1\%$  при коректному введенні даних)
- Швидка обробка великих масивів даних (до 100 000 точок за кілька хвилин)
- Повна автоматизація процесу від збору даних до звітності
- Легкість оновлення та коригування даних у режимі реального часу через GPS/GNSS
- Можливість 3D-візуалізації родовищ з урахуванням геологічних пластів
- Інтеграція з іншими даними (геофізичними, гідрологічними, геохімічними)

## Недоліки

- Потреба у спеціальному програмному забезпеченні (ArcGIS, QGIS, Surfer, Micromine)
- Необхідність спеціалістів з досвідом роботи 2-3 роки у геоінформаційних системах
- Значні обчислювальні ресурси для родовищ площею понад 200 га
- Висока вартість ліцензійного ПЗ (від 2000\$ до 10000\$ на робоче місце)
- Залежність від якості вхідних даних та геодезичної прив'язки
- Складність інтерпретації геологічних аномалій в автоматичному режимі



# Популярне ГІС-програмне забезпечення



Сучасні ГІС-програми є незамінними для визначення площі контурів запасів корисних копалин:

- **ArcGIS (ESRI)** – найпоширеніша платформа з повним набором інструментів для 3D-моделювання родовищ, обчислення запасів та створення високоточних карт (точність до 0,5%).
- **QGIS** – безкоштовна альтернатива з відкритим кодом, що підтримує всі основні геостатистичні методи та роботу з растровими даними.
- **Surfer (Golden Software)** – спеціалізоване ПЗ для створення контурних карт та обчислення об'ємів з високою точністю (похибка <1%).
- **Micromine** – професійне рішення для гірничодобувної галузі з інтегрованими інструментами геологічного моделювання та оцінки запасів.
- **AutoCAD Map 3D** – поєднує функціонал САПР та ГІС для проектування гірничих робіт та точного визначення контурів.

Вибір ПЗ залежить від масштабу родовища, необхідної точності (від 0,5% до 2%) та доступного бюджету (від безкоштовного QGIS до ArcGIS вартістю \$10,000).



# Фотограмметричний метод

1

## Збір даних

Аерофотознімання території родовища з використанням БПЛА (дронів) з роздільною здатністю до 2 см/піксель або отримання супутникових знімків з роздільною здатністю 30-50 см/піксель (WorldView, GeoEye). Для невеликих родовищ (до 5 км<sup>2</sup>) оптимальна висота польоту дрона – 80-120 м.

2

## Обробка знімків

Геометрична корекція та ортотрансформація знімків у спеціалізованому ПЗ (Agisoft Metashape, Pix4D) з прив'язкою до координатної системи UTM або локальної системи. Точність прив'язки з використанням наземних контрольних точок – до ±5 см. Створення цифрової моделі місцевості (DEM) з вертикальною точністю до 10 см.

3

## Визначення контурів

Автоматичне виділення контурів запасів на основі спектральних характеристик (NDVI, NDMI) та візуальних ознак з використанням алгоритмів машинного навчання або ручна векторизація. Можливість розпізнавання мінеральних відкладень з точністю 85-95% завдяки мультиспектральним камерам.

4

## Розрахунок площі

Обчислення площі виділених контурів у ГІС-системах з урахуванням рельєфу місцевості та кута нахилу поверхні (3D-площа). Точність визначення площі – 0,8-1,5% для ділянок площею до 100 га. Експорт результатів у формати SHP, DXF для подальшого використання в ArcGIS або QGIS.







# Застосування фотограмметричного методу

## Дослідження відкритих родовищ

Метод забезпечує точність визначення площі до 0,8-1,5% для кар'єрів площею до 100 га. Ефективний для твердих корисних копалин з чіткими візуальними контурами. Дозволяє створювати 3D-моделі кар'єру з роздільною здатністю до 5 см/піксель.

## Моніторинг змін території

Регулярна зйомка (щоквартальна або щомісячна) дозволяє відстежувати виробку запасів з точністю до 5-7%. Використання мультиспектральних камер підвищує точність розпізнавання контурів до 85-95%. Розрахунок об'ємів вийнятої маси здійснюється з похибкою менше 3%.

## Оцінка важкодоступних ділянок

Використання БПЛА з тривалістю польоту до 45 хвилин забезпечує зйомку ділянок площею до 300 га за один політ. Можливість роботи на крутосхилах (до 70°) та в умовах підвищеної небезпеки. Вертикальна точність створеної DEM – до 10 см з прив'язкою до системи UTM.

## Екологічний моніторинг

Аналіз спектральних індексів (NDVI, NDMI) для оцінки стану рослинності у санітарно-захисній зоні. Виявлення ерозійних процесів, забруднень водойм та відхилень від проекту рекультивації з використанням часових серій знімків. Точність виявлення порушених земель – до 95%.



# Переваги та недоліки фотограмметричного методу

## Переваги

- Можливість оцінки великих територій
- Відсутність потреби в контакті з поверхнею
- Швидке отримання результатів
- Можливість архівування даних

## Недоліки

- Залежність від погодних умов
- Точність залежить від якості знімків
- Потреба в спеціальному ПЗ для обробки
- Обмеження для підземних родовищ



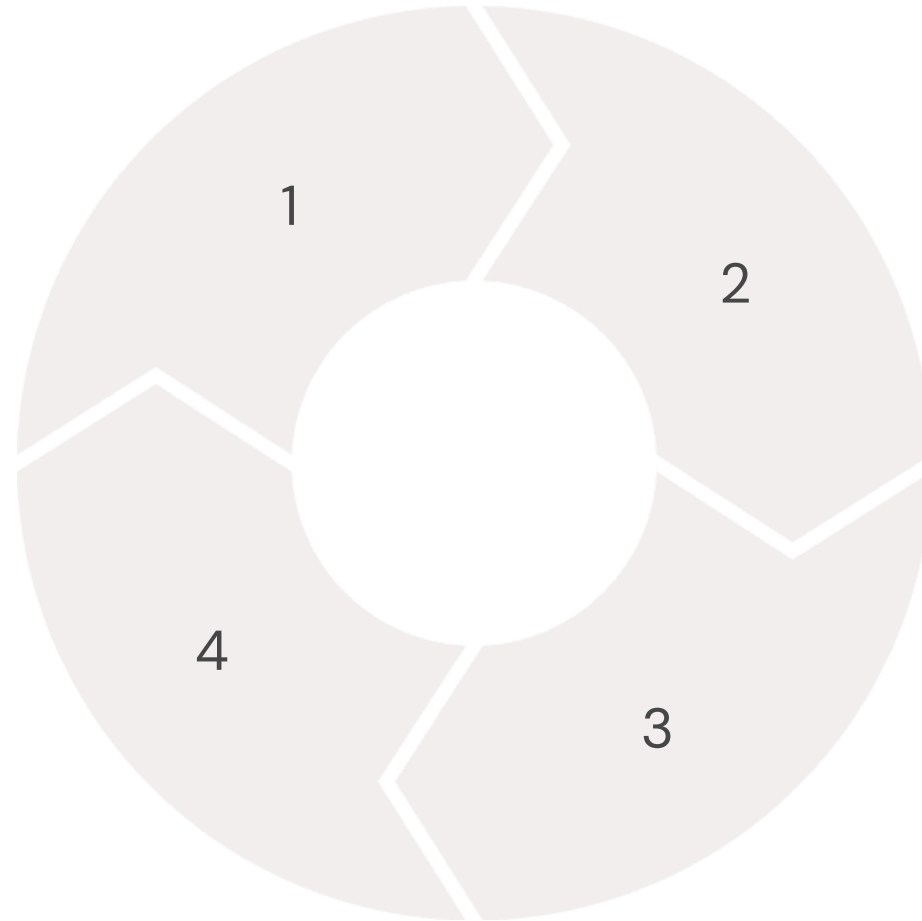
# Лазерне сканування та дрон-знімання

## Збір даних

Використання БПЛА з LiDAR-сенсорами (точність  $\pm 3$  см) та мультиспектральними камерами з роздільною здатністю до 2 см/піксель

## Моніторинг

Регулярне оновлення даних з періодичністю 2-4 тижні для відстеження динаміки видобутку та змін контурів



## Обробка даних

Створення хмари точок (до 500 точок/м<sup>2</sup>) та 3D-моделей місцевості з використанням програмного забезпечення Pix4D та Agisoft Metashape

## Аналіз

Визначення контурів запасів з точністю до 5 см та обчислення об'ємів методом порівняння різночасових DEM-моделей

Лазерне сканування та дрон-знімання дозволяють створювати високоточні тривимірні моделі родовищ з вертикальною точністю до 2-5 см та горизонтальною точністю до 3-7 см. Метод ефективний для відкритих гірничих робіт, кар'єрів та відвалів площею від 1 до 500 га, забезпечуючи визначення площі контурів запасів з похибкою менше 1%.



# Області застосування лазерного сканування



## Кар'єрні роботи

Визначення об'ємів видобутку з точністю до 0,5% для кар'єрів площею 10-500 га за допомогою наземних лазерних сканерів (точність  $\pm 2$  см) та БПЛА з LiDAR-сенсорами, що здатні сканувати до 500 точок/м<sup>2</sup>.



## Контроль запасів

Щотижневий моніторинг складів сировини об'ємом 5-100 тис. м<sup>3</sup> з використанням мультикоптерів, обладнаних RTK-системами позиціонування (точність  $\pm 3$  см) та спеціалізованого ПЗ Pix4D для аналізу даних.



## Моделювання рельєфу

Створення цифрових моделей місцевості з роздільною здатністю до 2 см/піксель для проєктування гірничих робіт, розрахунку оптимальних маршрутів транспортування та прогнозування стійкості бортів кар'єрів з вертикальною точністю до 5 см.

# Переваги та недоліки лазерного сканування

1

## Висока точність

Точність вимірювань до  $\pm 2$  см при використанні наземних лазерних сканерів та до  $\pm 5$  см при зніманні з БПЛА

2

## 3D-моделювання

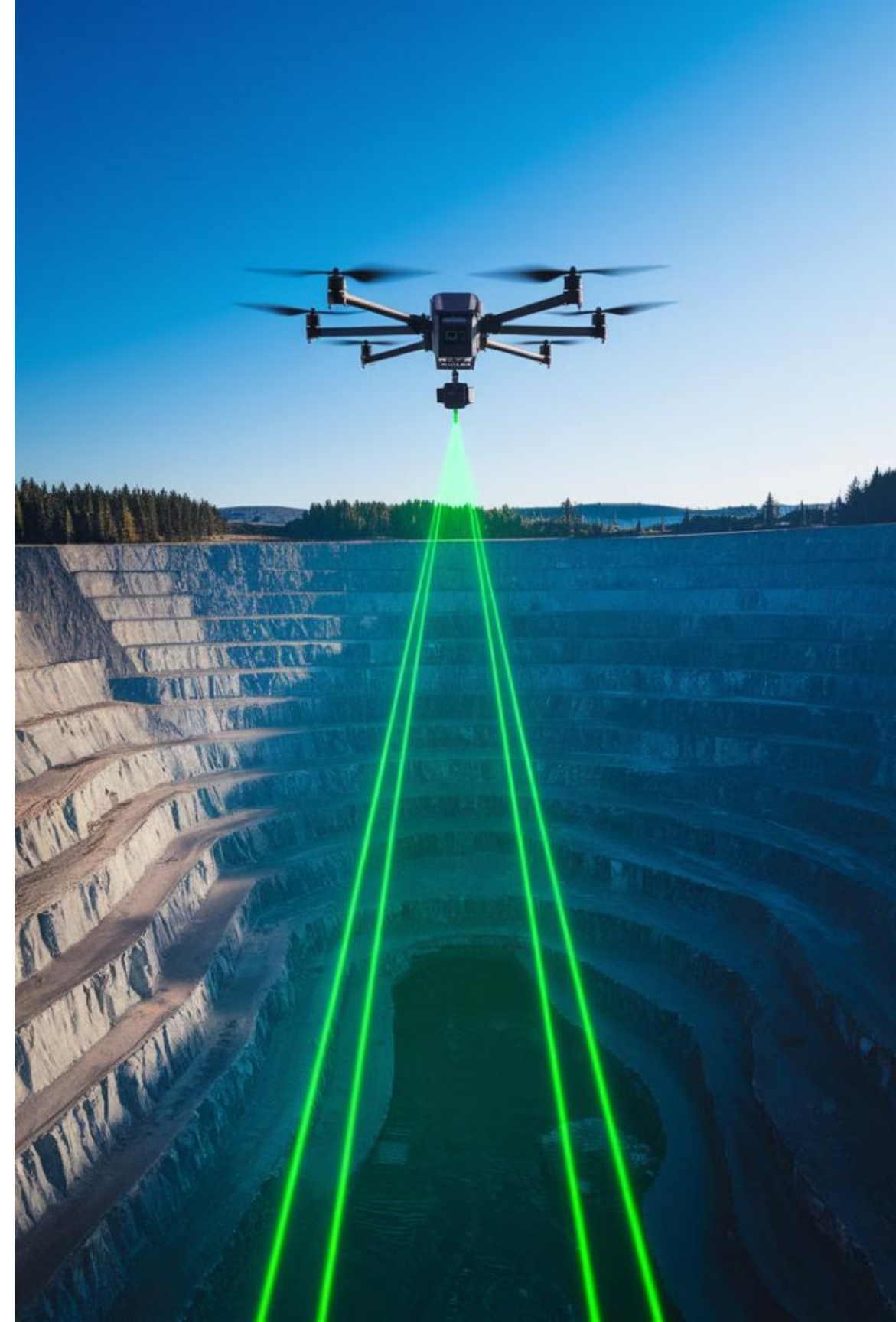
Створення цифрових моделей родовищ з роздільною здатністю до 2 см/піксель для оптимізації гірничих робіт

3

## Швидкість

Сканування до 500 точок/м<sup>2</sup> на площі 10-500 га з можливістю обробки даних протягом доби

Незважаючи на численні переваги, метод має суттєві недоліки: висока вартість обладнання (від 30 000 до 150 000 євро за комплект), потреба у кваліфікованих спеціалістах зі знанням спеціалізованого ПЗ (Pix4D, Agisoft Metashape), та залежність від метеорологічних умов (неможливість проведення робіт при опадах, сильному вітрі понад 12 м/с та недостатньому освітленні).







# Геостатистичний метод

1

## Інтерполяція

Математичне моделювання розподілу корисних копалин на основі просторової кореляції даних опробування свердловин

2

## Крігінг

Оптимальний алгоритм інтерполяції з мінімальною дисперсією оцінки, розроблений південноафриканським інженером Д. Крігом

3

## Варіограми

Графічне відображення просторової залежності між значеннями вмісту корисного компонента в пробах на різних відстанях

Геостатистичний метод застосовується для оцінки запасів родовищ зі складною геологічною будовою. Він базується на теорії регіоналізованих змінних, що дозволяє визначати запаси з точністю до 85-95% при використанні програмних комплексів Surpac, Micromine та Datamine. Метод особливо ефективний для родовищ з нерівномірним розподілом корисних компонентів, дозволяючи створювати блочні моделі з детальністю до 1-5 м.

# Процес геостатистичного аналізу

1

## Збір та підготовка даних

Систематизація координат свердловин, результатів опробування, геологічних журналів та аналізів вмісту корисних компонентів з точністю до 95% достовірності.

2

## Побудова та аналіз варіограм

Математичне моделювання просторової залежності між значеннями вмісту корисного компонента на різних відстанях для визначення радіусу впливу проб та анізотропії родовища.

3

## Застосування методу крігінгу

Оптимальна інтерполяція з мінімальною дисперсією оцінки за алгоритмом Д. Кріга з використанням програмних комплексів Surpac, Micromine або Datamine для створення неперервної поверхні розподілу вмісту.

4

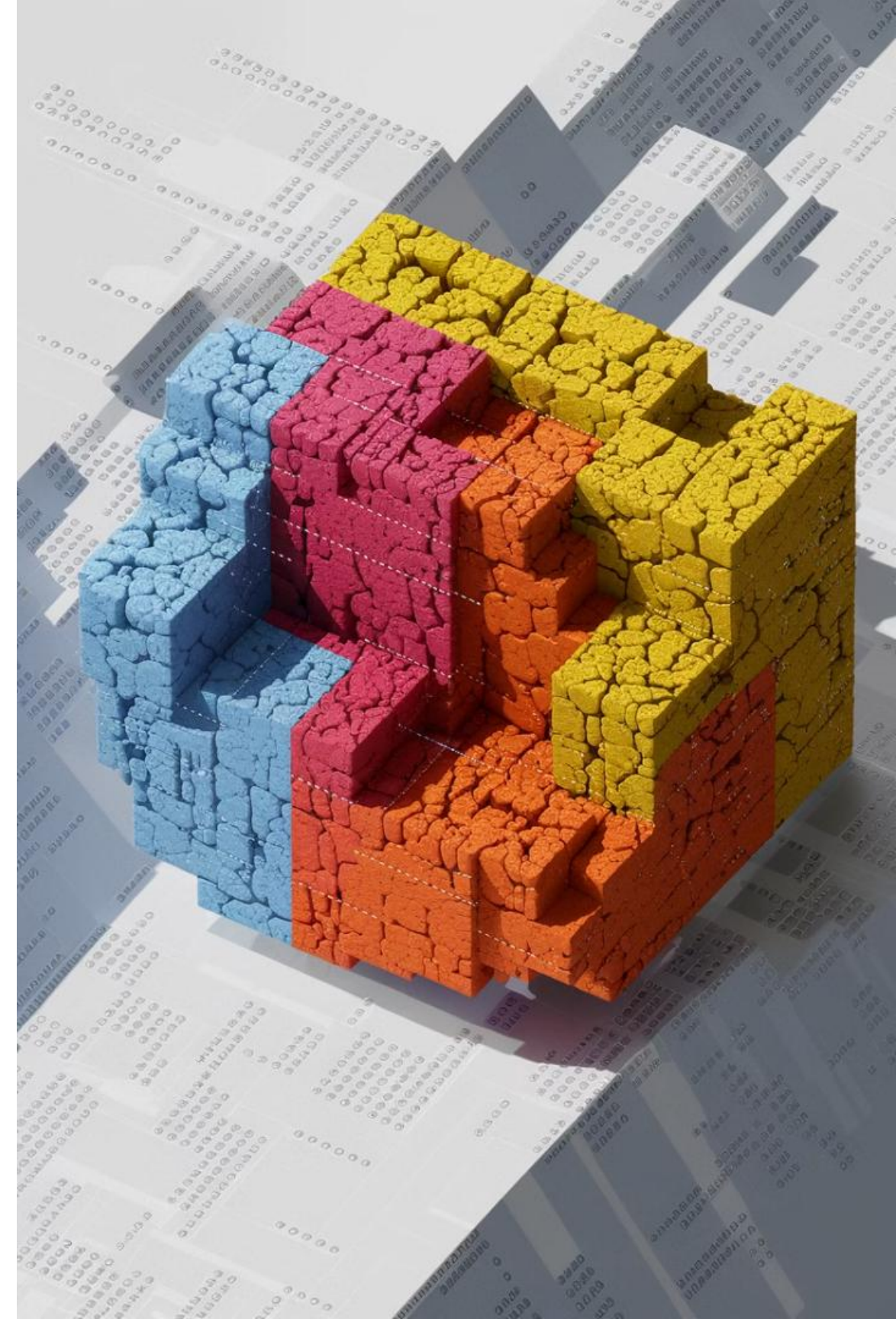
## Блочне моделювання та оцінка запасів

Розрахунок площі контурів та об'єму запасів з детальністю до 1-5 м на основі інтерпольованих даних, з урахуванням геологічних обмежень та бортового вмісту корисного компонента.

5

## Валідація та оцінка точності

Перехресна перевірка моделі з точністю 85-95% шляхом порівняння з контрольними даними, аналіз похибки та невизначеності оцінки запасів для родовищ зі складною геологічною будовою.





# Переваги та недоліки геостатистичного методу

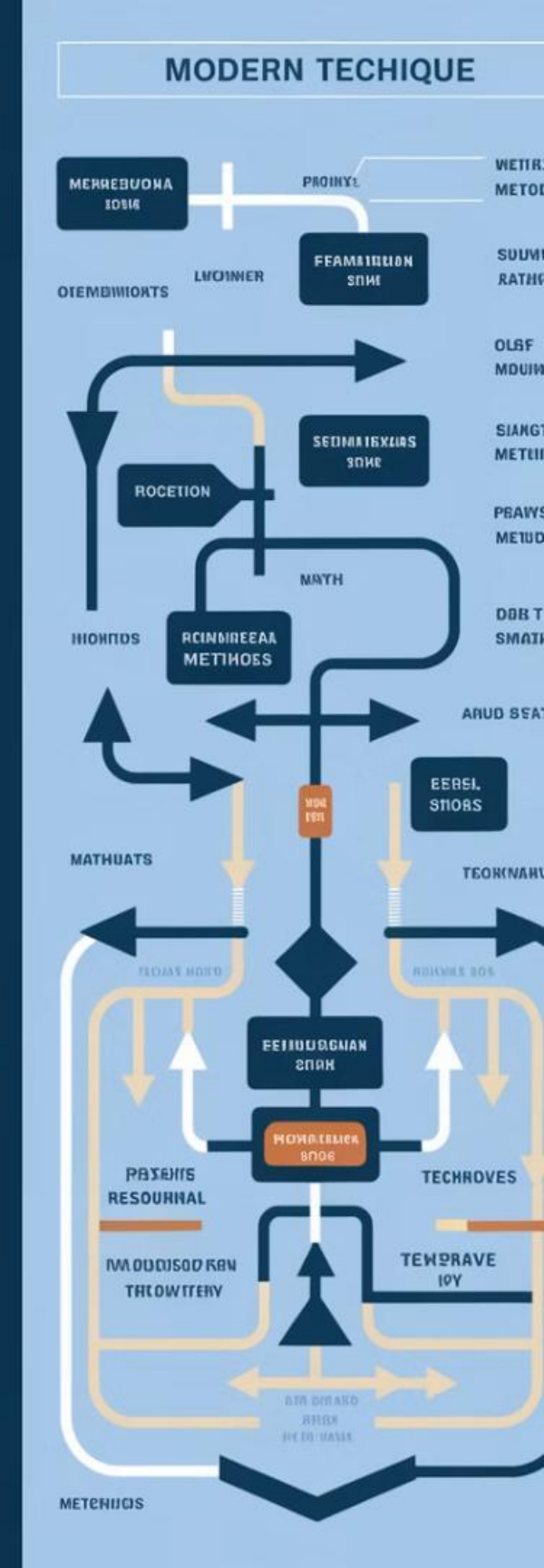
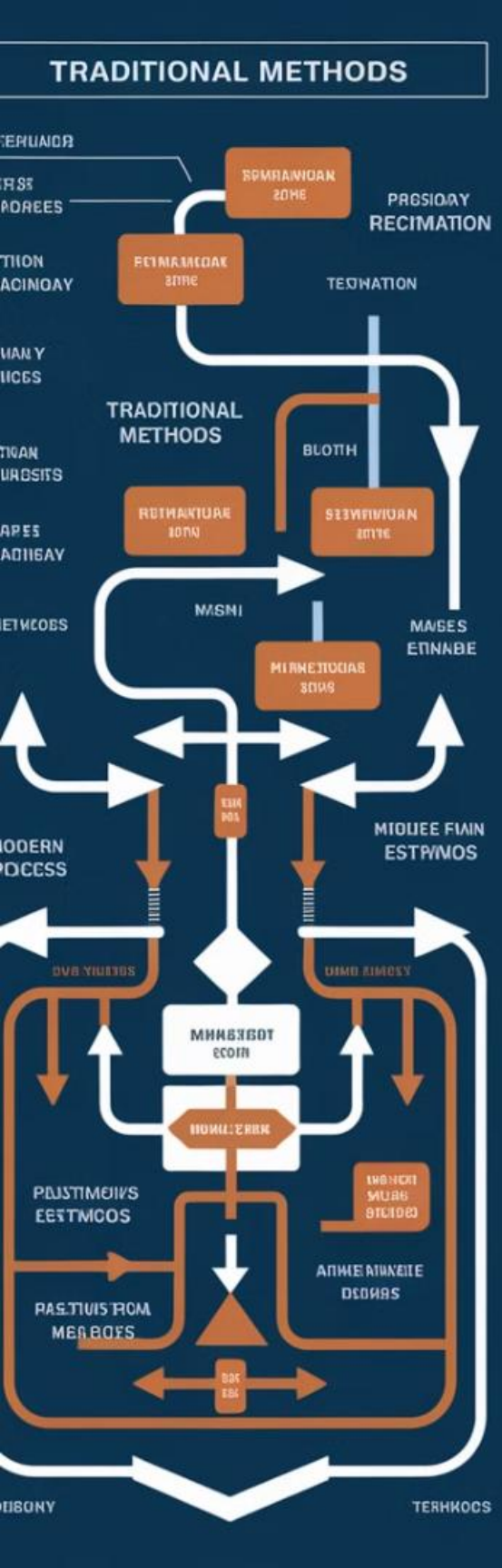
## Переваги

- Висока точність для складних рельєфів
- Можливість прогнозного аналізу
- Мінімізація впливу випадкових похибок
- Оцінка достовірності результатів
- Врахування просторової кореляції даних

## Недоліки

- Потреба у великій кількості вихідних даних
- Складність реалізації
- Високі вимоги до обчислювальних ресурсів
- Необхідність спеціальних знань
- Складність інтерпретації результатів





# Порівняння методів визначення площі контурів запасів

Метод	Точність	Швидкість	Вартість	Складність
Графічний	Низька	Низька	Низька	Низька
Аналітичний	Висока	Середня	Низька	Середня
Планіметричний	Середня	Середня	Середня	Низька
ГІС-метод	Висока	Висока	Висока	Висока
Фотограмметричний	Висока	Висока	Висока	Висока
Лазерне сканування	Дуже висока	Висока	Дуже висока	Висока
Геостатистичний	Дуже висока	Середня	Висока	Дуже висока