ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

1. Универсальные геоинформационные системы (ГИС) используются как цифровая основа для интеграции разнородных геологических данных (топография, космоснимки, геофизические и геохимические профили):
• ArcGIS Pro / ArcMap. Мировой стандарт. Идеален для ведения баз геоданных, пространственного анализа и интеграции с корпоративными хранилищами. Модуль Geostatistical Analyst позволяет проводить продвинутую интерполяцию данных.
• QGIS. Мощная бесплатная альтернатива с открытым исходным кодом. Благодаря плагинам (например, Midvatten для гидрогеологии или Qgis2threejs для 3D-визуализации) отлично подходит для первичной обработки и увязки планов и разрезов.
• ГИС INTEGRO. Российская геоинформационная система, специально разработанная для комплексного анализа геолого-геофизических данных, построения разрезов и увязки их в едином 3D-пространстве.

2. Горно-геологические информационные системы (ГГИС) предназначены для 3D-моделирования и подсчета запасов.
Для создания экспертной модели (построения блочной модели месторождения, триангуляции рудных тел, анализа данных опробования скважин) необходимо программное обеспечение. Micromine и Leapfrog Geo, это лидеры в экспертном моделировании. Micromine — универсальный инструмент от ввода скважин до проектирования горных работ, а Leapfrog использует неявное (имплицитное) моделирование, позволяя мгновенно строить сложные поверхности и контакты на основе RBF-функций.
Datamine и Surpac, это классические ГГИС для детального каркасного и блочного моделирования, геостатистического анализа (кригинг) и оценки запасов.

3. Геостатистика и математическое моделирование.
Если экспертная модель включает сложную математическую оценку рисков и неопределенностей, то применяется Isatis.neo - Профессиональный софт для продвинутой геостатистики (моделирование изменчивости, симуляции, оценка неопределенности контуров).

Оптимальный рабочий процесс для экспертной работы выглядит как связка двух сред:
QGIS / ArcGIS Pro — сбор всей полевой информации, оцифровка архивных карт, привязка геофизики, управление геопорталом участка.
Micromine / Leapfrog Geo — импорт подготовленной базы скважин из ГИС, создание трехмерных солидов геологических тел, блочное моделирование и финальная экспертная оценка.

Экспертная модель (Expert Knowledge-Based Model) — это математическая и геологическая матрица, которая переводит качественный опыт геологов в точные цифровые инструкции для компьютера чаще всего в ГИС-программах вроде QGIS, GRASS GIS, MapInfo Pro, ArcGIS Pro (Esri), Панорама (ГИС Карта).

Когда есть множество слоев данных (карта разломов, карта интрузий, литология, геохимия), экспертная модель позволяет объединить их в единую карту перспективности (Mineral Prospectivity Mapping), где каждому поисковому критерию присваивается свой «вес» и прописываются жесткие правила взаимодействия по принципу: «Если фактор А присутствует, а фактор Б находится ближе 500 метров, то вероятность обнаружения руды равна Х».

Подход на основе Mineral System Approach рассматривает месторождение не просто как изолированную точку, а как результат работы природного конвейера, состоящего из 4 элементов:
- Источник (Source) отвечает на вопрос «Откуда взялись металлы и флюиды».
- Путь (Pathway) отвечает на вопрос «По чему они двигались вверх» (разломы).
- Ловушка (Trap) отвечает на вопрос «Что заставило их остановиться» (литология, структура).
- Сохранность (Preservation) отвечает на вопрос - «Не разрушилось ли месторождение позднейшей эрозией».

ИИ предоставил как пример, условную Экспертную модель для оруденения золото-кварцевого (мезотермального) типа, адаптированную под масштаб участка в несколько километров.
Индекс перспективности от 1 до 10 (где 10 — максимальная важность критерия для прогноза).

Элемент Минеральной системы	Поисковый критерий (Картируемый признак)	Вес критерия (1-10)	Правило ГИС-моделирования (Буферные зоны и условия)
1. Источник	Расстояние до рудогенерирующей интрузии (гранодиориты/диориты)	8	Оптимальный буфер: от 500 м до 2 км от контакта. Внутри самой интрузии вес падает до 2, далее при 3 км — до 0.
2. Пути миграции	Расстояние до разломов (структур растяжения)	10	Оптимальный буфер: до 300 метров от оси разлома.
3. Пути миграции	Плотность разломов (линеаментов)	7	Выделение зон со значениями плотности выше Q3 (верхнего квартиля) для данного участка.
4. Фокусировка	Узлы пересечения разломов разных направлений	9	Локальный поисковый буфер с радиусом 150 метров вокруг точки пересечения.
5. Ловушка (физическая)	Литологический контакт (контраст хрупкости)	8	Пересечение слоя хрупких пород (песчаники/граниты) с пластичным экраном (сланцы). Буфер 100 м от контакта.
6. Ловушка (химическая)	Наличие геохимического барьера (известняки)	6	Логическое условие - присутствие вмещающих карбонатных пород в зонах влияния разломов.
7. Сохранность	Возраст вмещающих пород	Ограничение	Все породы, которые моложе возраста интрузии, полностью исключаются из анализа (Вес = 0).

Правило 1: Буфер 500 м – 2.0 км от интрузии
Сама интрузия при остывании сжимается и часто становится «сухой». Непосредственный контакт (0–200 м) слишком горячий, там образуются высокотемпературные минералы, но золото часто выносится дальше. Зона от 500 м до 2 км — это температурный оптимум (300–400°C), где флюид остывает настолько, что золото выпадает в осадок вместе с кварцем.
Правило 2: Расстояние до разлома до 300 метров
Главный шов разлома часто заполнен глинистым «стертым» материалом (милонитом), который непроницаем для растворов. Однако в стороны от разлома на 100–300 метров отходят оперяющие трещины («оперение разлома»). Именно в этих трещинах падает давление флюида (декомпрессия), что приводит к бурному вскипанию раствора и осаждению рудных минералов.
Правило 3: Выделение зон максимальной плотности разломов
Отдельная жила дает мелкое проявление. Для формирования месторождения нужна «губка» — зона, где миллионы мелких трещин создают огромный суммарный объем пустот. Статистический порог верхнего квартиля (Q3) позволяет ГИС-программе отсечь фоновую трещиноватость и подсветить только зоны тектонического меланжа и дробления.
Правило 4: Буфер 150 м вокруг пересечений разломов
Точка пересечения — это вертикальный канал («труба»). Раствор здесь движется не линейно, а вихреобразно, поднимаясь снизу вверх. Зона максимального дробления пород вокруг осевого пересечения редко превышает 150 метров. Заложение скважины именно в этот радиус гарантирует подсечение «рудного столба» — зоны богатых руд.
Правило 5: Контакт хрупких и пластичных пород
Тектонический экран. Восходящий рудный раствор движется по хрупким песчаникам, но упирается в вязкий, непроницаемый глинистый сланец, который над ними залегает. Раствор не может пройти выше, скапливается под сланцем, создавая зону так называемого «подвешенного» или «экранного» оруденения. Контур шириной 100 м вдоль такого контакта — критически важная мишень.

Для объединения в ГИС все перечисленные слои растрируются, то есть превращаются в пиксельные карты, где каждому пикселю присваивается балл от 1 до 10 на основе правил записанных выше. Затем программа выполняет расчет Индекса Перспективности по формуле взвешенного наложения (Weighted Overlay):

Индекс Перспективности = (S1 x W1) + (S2 x W2) + … + (Sn x Wn)

где S балл пикселя на карте фактора, а W вес этого фактора из таблицы.

Получается итоговая карта, на которой ярко-красные пиксели показывают места, где совпали все факторы. После выполнения бустинга (boosting берёт расчётные стандартизированные данные и находит скрытые нелинейные зависимости между ними) столбец «Вероятность оруденения» (Ore_Probability) экспортируется обратно в ГИС-программу.

В результате мы видим карту поискового участка, например, такую:

Зона 0.0–0.3 (синий цвет) означает, что тектоника неблагоприятна, интрузия далеко, литология молодые глины. Бурить не рекомендуется.

Зона 0.3–0.7 (желтый цвет) означает, что факторы выражены частично. Зоны второго порядка.

Зона 0.7–1.0 (ярко-красный цвет) означает, что имеются локальные аномалии, где пересеклись разломы с максимальным WoE-контрастом, порода хрупкая и расстояние до скрытой интрузии оптимально. Это и есть точки выноса в натуру для заложения буровых скважин.

На рисунке показан условный пример карты поискового участка.

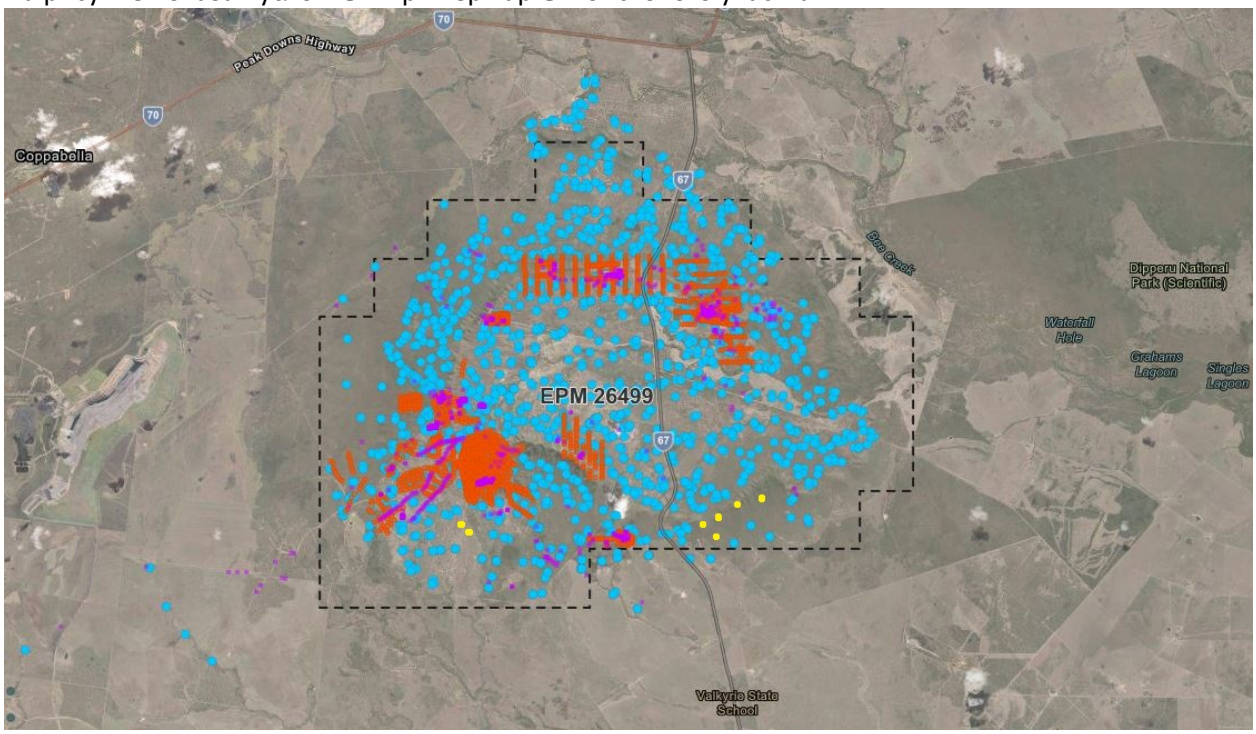


Рисунок взят из статьи «Mineral Potential Mapping. An example from the Bundarra porphyry project, Central Queensland», Tom Czertowicz, Kenex Geologist, 13.06.2022.

Weights of Evidence (WoE) — принятое название для байесовского вероятностного метода, когда для каждого фактора (например, буфера разломов) алгоритм сопоставляет сетку пикселей участка с известными точками минерализации (обучающая выборка).