



Федеральное государственное бюджетное учреждение  
"Всероссийский научно-исследовательский институт  
минерального сырья им. Н.М. Федоровского  
(ФГБУ "ВИМС")

**ИНФОРМАЦИОННО-  
АНАЛИТИЧЕСКИЕ  
МАТЕРИАЛЫ:**

**МИРОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ  
РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕТОДОВ И  
МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И  
ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

**СЕРИЯ:  
ПОИСКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Москва 2024 г.

**Обзор 3-3**  
**ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ,**  
**ПОИСКОВЫЕ, ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫЕ И ДОБЫЧНЫЕ РАБОТЫ**  
**НА ОСНОВЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ.**

*РЕДАКТОР-СОСТАВИТЕЛЬ:*  
*В.В. Коротков*

*СОДЕРЖАНИЕ:*

<b>А. ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	<b>Стр.</b>
<b>I. НОВЫЙ МЕТОД РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГНОЗА, ОСНОВАННЫЙ НА СОВРЕМЕННОЙ 3D-ГРАФИКЕ.....</b>	<b>5</b>
1. Введение.....	5
2. Справочная информация о 3D-визуализации в реальном времени.....	7
3. Создание прогнозно-минерагенических карт.....	12
3.1. Динамические геохимические карты (DGMS).....	12
3.2. Интерактивная геологическая карта (IGM).....	14
3.3. Обратная билинейная интерполяция.....	16
3.4. Композиция растровых изображений.....	17
4. Прогнозирование в рудном районе Чжунуо.....	18
5. Обсуждение и выводы.....	19
<b>II. ИНФОРМИРОВАННОЕ ЛОКАЛЬНОЕ СГЛАЖИВАНИЕ В 3D-НЕЯВНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ.....</b>	<b>21</b>
1. Введение.....	21
2. Материалы и методы.....	24
2.1. Обычный Кригинг.....	24
2.2. Эффект самородка и отфильтрованный Кригинг.....	25
2.3. Локальное сглаживание.....	27
2.4. Локальное сглаживание в геомоделировании.....	28
2.5. Информативное локальное сглаживание.....	29
2.6. Масштабирование.....	30
3. Результаты.....	31
3.1. Модель с равномерно расположенными данными.....	31
4. Обсуждение и выводы.....	34
<b>III. 3D-ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУДНЫХ РАЙОНОВ (Тасмания).....</b>	<b>38</b>
1. Введение.....	38
2. Геологическая обстановка.....	39
3. Методология инверсии и данные.....	41
3.1. Геофизическая валидация эталонной модели.....	41
3.2. Совместное инверсионное моделирование и моделирование чувствительности.....	43
3.3. Источники и подготовка данных.....	44

3.4. Физические свойства горных пород.....	45
4. Модель в масштабе Тасмании.....	46
5. Регион Розбери.....	48
5.1. Район Роузбери-Лайелла.....	53
5.2. Район Роузбери-Пьемана.....	58
5.3. Район Роузбери Норт.....	61
6. Северо-Западная Тасмания.....	62
6.1. Район Хизлвуд-Луина-Варата.....	63
7. 3D-модели Восточного террейна (ЕТТ).....	64
7.1. Лебрина.....	64
7.2. Район Альбертон-Матинна.....	67
7.3. Район Скамандер.....	68
8. Выводы.....	72

#### IV. ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ РУДНОГО РАЙОНА НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

<i>(рудный район Ашеле, Синьцзянь, Китай)</i> .....	74
1. Введение.....	74
2. Геологические условия.....	75
3. Метод трехмерного моделирования.....	76
4. Интерпретация данных.....	79
4.1. Анализ данных о физических свойствах.....	79
4.2. Интерпретация геофизической информации.....	80
4.2.1. Гравитационные и магнитные данные.....	81
4.2.2. Магнитотеллурические данные.....	83
4.2.3. Интерпретация информации.....	84
5. Построение модели.....	87
6. Результаты и обсуждение.....	90
6.1. Структурные характеристики трехмерной модели.....	90
6.2. Прогнозная информация.....	92
6.3. Обсуждение.....	93
7. Выводы.....	94

#### V. 3D-ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЮСГ (*районы Вале-ду-Кюрасас и Риачо-ду-Понтал, Бразилия*).....

1. Введение.....	95
2. Геологическое строение и минерализация.....	97
3. Используемые геофизические данные.....	100
4. 3D модели магнитной и гравитационной инверсии.....	104
5. Результаты.....	105
5.1. Гравитационные и магнитные характеристики.....	105
5.2. 3D инверсионные модели.....	106
6. Минеральные системы рудных районов ЮСГ.....	109
7. Поисковый потенциал рудных районов.....	112
8. Выводы.....	113

## Б. ПОИСКОВЫЕ, ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫЕ И ДОБЫЧНЫЕ РАБОТЫ

<b>VI. ПОСТРОЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ 3D МОДЕЛИ РУДНОГО ТЕЛА НА ОСНОВЕ РЕКОНСТРУКЦИИ И ДЕФОРМАЦИИ СЕТКИ.....</b>		115
1. Введение.....		115
2. Моделирование геологических тел.....		116
3. Методология.....		119
4. Результаты.....		127
5. Обсуждение.....		130
6. Выводы.....		131
<b>VII. ТРЕХМЕРНЫЙ ЛОКАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА БАЙЯНХЭ (<i>вулканический пояс Сюэмистан, Синьцзян, Китай</i>)....</b>		133
1. Введение.....		133
2. Геологические предпосылки.....		133
3. Металлогенический прогноз в 3D.....		134
3.1. 3D геологическое моделирование.....		134
3.2. Создание модели количественного прогнозирования.....		136
4. Результаты прогноза.....		139
4.1. Метод взвешенных доказательств.....		140
4.2. Метод информационной разведки.....		141
4.3. Анализ результатов прогноза.....		142
4.4. Определение перспективных зон.....		143
4.5. Оценка прогнозных ресурсов.....		144
5. Выводы.....		145
<b>VIII. ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАОЗИГОУ (<i>Западный Циньлин, Китай</i>).....</b>		146
1. Введение.....		146
2. Геологические условия.....		147
3. Сверточная нейронная сеть и архитектура модели 3D-CNN.....		150
4. Набор данных и геологическое 3D-моделирование.....		152
5. Геохимическое 3D-моделирование.....		155
6. Результаты и обсуждение.....		160
7. Выводы.....		164
<i>Источники:</i> .....		165

## **А. ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.**

### **I. НОВЫЙ МЕТОД РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГНОЗА, ОСНОВАННЫЙ НА СОВРЕМЕННОЙ 3D-ГРАФИКЕ [7].**

#### **1. Введение**

Трехмерное геологическое моделирование - это метод, который использует компьютерные технологии для объединения таких инструментов, как управление пространственной информацией, геологическая интерпретация, пространственный анализ и прогнозирование, геостатистика, анализ содержимого объектов и графическая визуализация в 3D-среде, чтобы применить их к геологическому анализу. Этот метод играет важную роль в прогнозировании ресурсов, особенно для «скрытых» ресурсов. При 3D-геологическом моделировании в масштабе районов сосредоточения руды необходимо изобразить геологическую структуру во всем большом диапазоне глубин. Полагаться только на геологическую информацию, полученную в результате поверхностных наблюдений, и спорадическую или относительно локализованную информацию из скважин, не может удовлетворить эти потребности. Поэтому необходимо внедрить геофизические методы. В последние годы метод объединения геологических и геофизических методов, то есть 3D геолого-геофизическое моделирование, был принят при моделировании в масштабе рудных районов.

Признано, что для повышения эффективности регионального прогнозирования полезных ископаемых требуется лучшая идентификация и картографирование минеральных систем, поскольку они формируются в результате перемещения материалов (обычно флюидов) в трехмерных геологических средах. Важность картирования геологии в 3D становится все более очевидной. Чтобы сделать это картирование максимально точным, требуется интеграция геофизической и др. информации со структурной интерпретацией результатов геологических наблюдений и картографирования.

При проведении комплексного регионального минерагенического прогнозирования различные разнородные данные, полученные различными способами, сначала должны быть обработаны в виде различных карт, затем интегрированы в программное обеспечение ГИС. Эти карты можно разделить на «качественные» и «количественные». Качественные, такие как геологические и др., составляются «вручную», в то время как количественные, такие как геохимические и др., создаются с использованием собранных числовых значений.

В традиционном программном обеспечении ГИС для интеграции качественных и количественных данных в одном пространстве количественные данные должны быть

векторизованы в виде контурных карт, что приводит к потере некоторой информации. Некоторые более продвинутые ГИС-программы могут визуализировать растровые и векторные данные в одном пространстве, позволяя визуализировать количественные данные в виде растрированных тепловых карт, которые более точны, чем векторизованные контурные карты.

ArcGIS хорошо поддерживает как растровые, так и векторные данные и широко используется для визуализации геохимических данных. ArcGIS используется просто как генератор растровых изображений, и никаких вычислений на основе растровых изображений не требуется, хотя вычисления на основе растровых изображений поддерживаются ArcGIS и в основном используются при обработке данных дистанционного зондирования.

Global Mapper также хорошо поддерживает гибридный формат данных и обладает более мощными возможностями вычислений на основе растровых изображений, чем ArcGIS. Между тем, другое широко используемое программное обеспечение, ENVI, очень хорошо поддерживает вычисления на основе растровых изображений, но плохо справляется с обработкой векторных данных. Обе программы широко используются для обработки данных дистанционного зондирования, но не для комплексной оценки регионального минерагенического прогноза.

Интерактивные программы для создания 3D-глобусов, такие как Google Планета Земля и Ovital Map, могут вводить векторные данные через файлы KML, а растровые - через файлы GeoTIFF.

Google Планета Земля рисует векторные элементы, такие как точки, линии и границы, непосредственно в 3D-пространстве, в то время как для растровых данных используется метод дальнейшего расширения z-буфера и повторного рисования для наложения растровых изображений на земной шар. Это приводит к двум проблемам: первая заключается в том, что из-за ограничения точности z-буфера во время вторичного рисования может возникать z-искажение, вызывающее мерцание; вторая заключается в том, что порядок наложения растровых и векторных данных не может быть скорректирован.

В отличие от Google Планета Земля, Ovital Map использует подход предварительной визуализации. Программа сначала отображает растровые и векторные данные в соответствующих фрагментах на центральном процессоре, затем загружает их в виде текстур на 3D-глобус. Поскольку процессоры плохо справляются с обработкой растровой графики с точки зрения производительности, этот метод предварительной визуализации приводит к крайне низкой эффективности растровых данных, поскольку недавно импортированные

растровые данные должны долго ждать завершения генерации фрагмента. Таким образом, взаимодействие с растровыми изображениями в реальном времени невозможно.

Таким образом, можно сказать, что существующее программное обеспечение для визуализации геологических данных и интерактивный 3D-глобус не могут удовлетворить потребности регионального прогнозирования. В этом исследовании представлен метод 3D визуализации данных, специально предназначенный для регионального прогноза, основанный на современной технологии обработки изображений GPU. Этот метод устраняет проблемы путем реализации динамических геохимических карт (DGMs) и интерактивных геологических карт (IGMs) со следующими функциями:

Во-первых, метод полностью основан на растровых изображениях. Все карты могут быть обработаны в виде двумерных матриц, что обеспечивает унификацию методов обработки данных.

Во-вторых, все карты могут быть отрисованы с использованием графического процессора для повышения эффективности отрисовки и обеспечения взаимодействия в режиме реального времени.

В-третьих, DGMs можно настраивать в режиме реального времени во время визуализации, делая области аномалий динамичными.

Новую программную систему, основанную на этом методе, и применили для геологоразведочной оценки рудного района Чжунуо, южный Тибет. Район характеризуется сильным вулканизмом и магматизмом. С северо-востока на юго-запад в этом районе сформировались вулканические породы палеогенового возраста и эоцен-миоценовые гранитные интрузии. В донных отложениях (1:50 000) в рудном районе наблюдаются геохимические аномалии меди, молибдена, свинца, цинка и других элементов, которые четко зонированы. Высокие содержания этих аномалий указывает на то, что район обладает большим металлогеническим потенциалом.

Преобразовав векторную геологическую карту в IGM, обработав геохимические данные в DGM, а затем объединив их с 3D-рельефом и спутниковыми снимками из Google Map Tiles API на интерактивном 3D-глобусе в этой программной системе, была проведена комплексная прогнозная оценка, которая значительно повысила эффективность поисковых работ в Западном Китае.

## **2. Справочная информация о 3D-визуализации в реальном времени.**

Составление карт - это, по сути, разновидность визуализации данных. Самой ранней известной визуализацией данных была карта Туринского папируса 1150 г. до н.э., которая

точно иллюстрировала распределение геологических ресурсов информацией о карьерах, подразумевая, что геология может быть одним из самых ранних методов визуализации данных.

Текущее развитие визуализации данных тесно связано с развитием компьютерных технологий. На заре развития компьютерных технологий, ограниченных вычислительной мощностью, визуализация данных обычно проводилась в виде 2D-графики. Современная технология 3D-визуализации данных в реальном времени становится основным методом визуализации данных в прогнозных целях.

3D-визуализация выполняется "в реальном времени", главным образом потому, что она основана на "рендеринге в реальном времени", который контрастирует с традиционным "офлайн-рендерингом". Основное различие между этими двумя типами рендеринга заключается в скорости. Рендеринг в реальном времени, появившийся примерно в 1990-х годах и ставший возможным благодаря развитию аппаратного и программного обеспечения, теперь позволяет выполнять работу того же качества за несколько миллисекунд. Благодаря программным системам, основанным на интерактивных 3D-моделях, цифровых двойниках и других 3D-технологиях реального времени, теперь сложные данные можно визуализировать в мгновение ока, обеспечивая существенные преимущества на нескольких этапах. Например, в тестовом тестировании Blender 2.91 циклы автономной визуализации обходятся в 3 минуты для рендеринга сцены в разрешении FHD, в то время как рендерингу Eevee в реальном времени, основанному на OpenGL, всего 0,5 минуты для рендеринга той же сцены в том же разрешении с аналогичным качеством изображения.

В 1995 году 3dfx представила первый в мире чип ускорителя 3D-графики потребительского уровня *Voodoo Graphics 3D*, который по-настоящему открыл эру 3D-графики в реальном времени. В чипе использовалась специальная интегральная схема для реализации распространенных алгоритмов 3D-рендеринга, включая выборку текстур, z-буферизацию, двойную буферизацию кадров, затенение Гуро, альфа-блендинг, сглаживание и т.д. Графические ускорители этого поколения назывались конвейерами с фиксированными функциями (FFPS), потому что процедура рендеринга должна была выполняться в фиксированном порядке, в котором были спроектированы чипы. Процесс рендеринга FFP осуществляется примерно в следующие этапы:

1. *Трансформация и освещение*. Здесь вершины преобразуются в пространство камеры с помощью матриц модель–вид–проекция (MVP). Затем для каждой вершины используется модель Блинна–Фонга для расчета освещенности каждой вершины, которая называется "освещение для каждой вершины" (рис. 1с);

2. *Примитивная сборка.* В соответствии с заданной приложением последовательностью вершины соединяются с поверхностями треугольников, которые становятся гранями или телами с многоугольной топологической структурой (рис. 1с);

3. *Растреризация.* Каждый треугольник, созданный на последнем этапе, растреризуется на пиксели. Для каждого пикселя используется алгоритм затенения Гуро для интерполяции координат освещения и УФ-излучения вершин вокруг каждого пикселя. На этом этапе данные по вершинам преобразуются в данные по пикселям (рис. 1d);

4. *Отображение текстур.* Диффузные текстуры, предоставляемые приложением, отбираются в соответствии с УФ-координатами каждого пикселя. Затем в каждом пикселе рассеянный цвет увеличивает освещенность для получения окончательного цвета (рис. 1f).

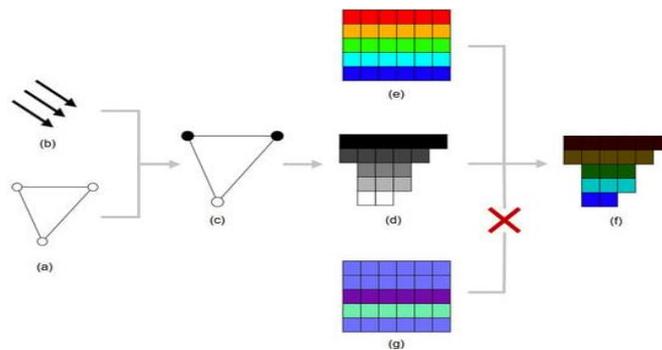


Рис. 1. (а) Треугольник, представленный тремя вершинами, завершившими преобразование. (б) Направленный свет. (с) Освещение рассчитывается для каждой вершины. (d) Треугольник с растреризованным освещением с использованием штриховки Гуро. (е) Диффузная текстура. (f) Умножения освещенности на пиксель - окончательное изображение. (g) Обычная текстура, которая не может быть применена.

Поскольку все функции FFPS становятся возможными благодаря точной конструкции интегральной схемы, добавление новых алгоритмов рендеринга означает разработку и производство новых чипов, т. е. FFPS являются непрограммируемыми, что серьезно ограничивает эволюцию методов рендеринга. Например, *normal mapping* - это распространенный метод текстурного отображения, используемый для имитации освещения неровностей и вмятин даже при традиционном офлайн-рендеринге, но неприменимый при рендеринге в реальном времени на основе FFP, как показано на рисунке 1. Это связано с тем, что освещение рассчитывается для каждой вершины, а не для каждого пикселя. Без обычного отображения “виртуальная” 3D-графика далека от “реальности”, как мяч для гольфа на рисунке 2.

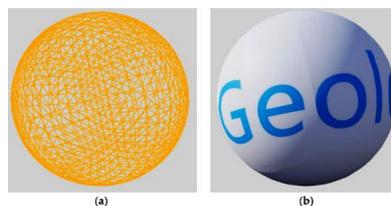


Рис. 2. Полигональная модель мяча для гольфа, визуализированная с использованием FFP. (а) Модель, визуализированная в виде каркаса. (б) Та же модель, визуализированная с освещением.

В 1999 году выпуск графического ускорителя Nvidia GeForce 256 ознаменовал конец FFPs и наступление эры программируемых конвейеров (PPS), которые поддерживались чипами нового типа, называемыми графическими процессорами (GPU). Графические процессоры реализуют “одну инструкцию–несколько данных (SIMD)” для достижения высокопроизводительных параллельных вычислений. При рендеринге каждое ядро графического процессора запускает математические алгоритмы для каждой вершины, пикселя и т.д., выполняя фрагменты кода, называемые “шейдерами”.

Рассмотрим C-код в алгоритме 1:

```

Line 0      if (a < b) {
Line 1          a * b;
Line 2      } else {
Line 3          a + b;
Line 4      }
```

В многоядерном процессоре, который обычно имеет архитектуру “множественные инструкции–множественные данные (MIMD)”, если нулевая строка имеет значение TRUE на core-0, но FALSE на core-1, core-0 затем перейдет к первой строке, в то время как core-1 перейдет к третьей строке на следующем цикле без каких-либо накладных расходов. Но с графическим процессором, независимо от результата нулевой строки, все ядра одновременно перейдут на первую строку, а затем на третью. Затем для каждого ядра будет выбран только тот результат, который соответствует нулевой строке, а остальные отбрасываются. Это называется “выравниванием” ответвлений. Очевидно, что все ядра выполняют бесполезные вычисления по крайней мере один раз, тратя впустую тактовые циклы. Этот пример объясняет одну из причин, по которой алгоритмы должны быть переписаны для соответствия SIMD, но только определенные типы алгоритмов могут извлечь из этого выгоду. К счастью, обработка растровых изображений, естественно, совместима с SIMD, поэтому графические процессоры стали лучшей практикой для архитектуры SIMD.

Графические процессоры вскоре начали менять рендеринг в реальном времени с традиционного “фиксированного” на современный “программируемый”, позволяя внедрять в конвейер рендеринга новые алгоритмы. Упомянутая выше проблема отображения нормалей была решена с помощью первого программируемого графического ускорителя Nvidia GeForce 3, что ознаменовало большой скачок в рендеринге графики в реальном времени. Рисунок 3 демонстрирует, как современные PPS обрабатывают рендеринг с поддержкой отображения нормалей, используя программный подход, называемый “отложенный рендеринг”, в отличие от традиционного “прямого рендеринга” FFP. При отложенном рендеринге векторные данные растрируются в кратчайшие сроки, в результате чего создается группа специальных

растровых изображений, называемых G-буфером. Затем итоговое изображение вычисляется по пикселям из G-буфера. При нормальном отображении та же модель «мяча для гольфа» показывает гораздо лучший результат (рис. 4).

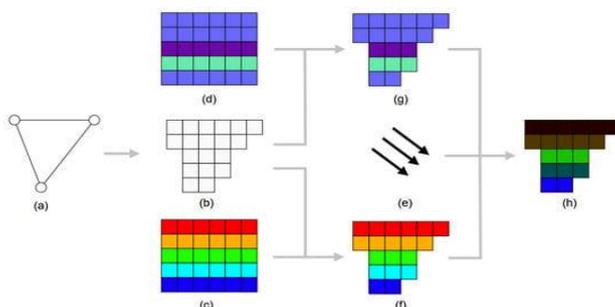


Рис. 3. (a) Треугольник, представленный тремя вершинами - преобразование MVP. (b) Треугольник - растрируется перед освещением. (c) Диффузная текстура. (d) Обычная текстура. (e) Направленный свет. (f) В G-буфере получается диффузный буфер. (g) В G-буфере получается обычный буфер. (h) Освещение рассчитывается для каждого пикселя в G-буфере.

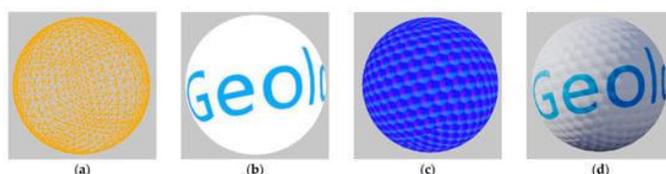


Рис. 4. Та же модель golf, что и на рисунке 2, но с дополнительной обычной текстурой. (a) Модель представлена в виде каркаса. (b) Диффузный буфер в G-буфере. (c) Обычный буфер в G-буфере. (d) Окончательное изображение после освещения и композиции.

Благодаря программируемости графических процессоров они больше не являются простыми устройствами обработки графики, а наиболее широко используемыми платформами параллельных вычислений. В 2003 году было обнаружено, что использование графических процессоров для решения задач общей линейной алгебры более эффективно, чем использование процессоров, открывая прелюдию к вычислениям на графических процессорах общего назначения (GPGPU).

Google изобрел “скользящую карту”, также известную как “плиточная карта”, проложив путь для современных веб-карт. Мозаичные карты разделяют карту мира на несколько “уровней масштабирования” в соответствии с масштабом карты, и каждый уровень карты разделен на несколько квадратных плиток одинакового размера. Эти плитки объединены в квадродерево от самого низкого уровня к самому высокому, наподобие пирамиды, как показано на рисунке 5.

Наиболее используемой версией является CesiumJS, которая предоставляет возможность использовать 3D-глобус в браузере. Например, Cesium for Unreal, основанный на нативном цезии, позволяет пользователям создавать 3D-глобусы на основе движка Unreal Engine (рис. б) - одним из самых мощных движков рендеринга в реальном времени,

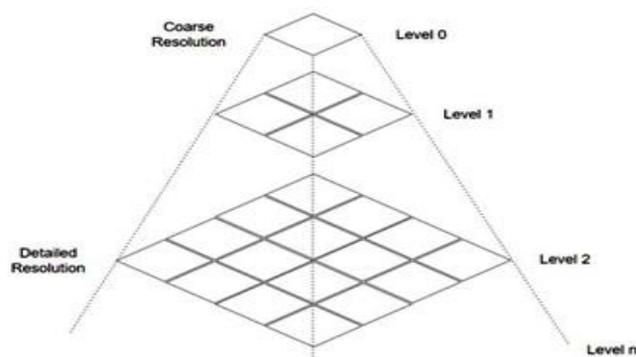


Рис. 5. Изображение пирамиды из плиток.

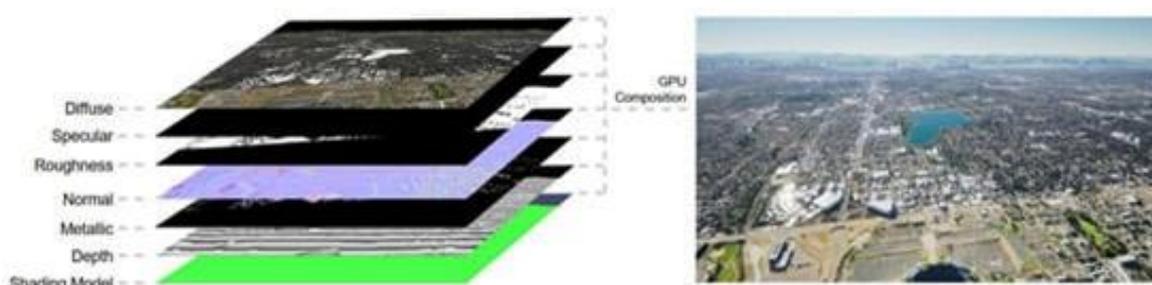


Рис. 6. Cesium для Unreal использует технологию отложенного рендеринга - конечное изображение создается с использованием G-буфера вместо прямой растеризации, что придает ему высокую настраиваемость.

### 3. Создание прогнозно-минерагенических карт.

Векторные данные не подходят для различных параллельных операций на графических процессорах. Чтобы использовать вычислительную мощность современных графических процессоров, структура данных должна быть изменена на растровые изображения. Таким образом IGM и DGM должны содержать два типа данных (качественные и количественные) в виде растровых изображений, позволяя выполнять вычисления на графических процессорах. На основе этих двух типов растровых изображений разработана программная система поверх Cesium для Unreal.

Из-за влияния кривизны земли эта система в настоящее время в основном предназначена для проведения региональной прогнозной оценки.

#### 3.1. Динамические геохимические карты (DGMS).

Были использованы данные региональной геохимической съемки в масштабе 1: 50 000 содержания Cu в донных отложениях в рудном районе Чжунуо для создания и визуализации DGM. Использованные 1457 образцов речных отложений были взяты с плотностью около 1 образца на 0,25 км<sup>2</sup>. Cu была проанализирована с помощью XRF (рентгенофлуоресценции). Статистические характеристики концентрации Cu обобщены в таблице 1.

Статистические параметры концентраций меди в донных отложениях в рудном районе Чжунуо.

Element	Cu
Number of Samples	1457
Mean	0.63
Std	1.73
CV	2.75
Median	0.17
MAD	0.09
Minimum	0.03
Maximum	45.91
25th percentiles	0.10
75th percentiles	0.42
95th percentiles	3.07
98th percentiles	5.34
Skewness	14.08
Kurtosis	329.54

Note: The unit of Cu is ppm (10<sup>-6</sup>). Std means the standard deviation; CV means the coefficient of variation; MAI means the median absolute deviation.

DGM был создан и визуализирован с помощью следующих этапов:

1. Одноканальное изображение формата float в формате TIFF с соотношением сторон, равным рамке карты рудного района Чжунуо, с максимальной длиной 512 пикселей. Четыре угла изображения имели соответствующие географические координаты, которые можно было вывести из карты рудного района.

2. Метод обратного взвешивания расстояний для интерполяции значения Cu для каждого пикселя на этом изображении, каждый пиксель сохранял значение в том пространственном положении, которому соответствовал каждый пиксель (рис. 7b).

3. 3-канальное (RGB) изображение в 8-битном формате высотой 1 пиксель и шириной 1024 пикселя с радужным градиентом с помощью OpenCV (рис. 7с.)

4. Растрирование слоев Cesium для Unreal.

5. Алгоритм “обратная билинейная интерполяция” (подробно объясняется ниже). Пространственное положение каждого пикселя было определено путем вычисления УФ-координат каждого пикселя на 3D-глобусе.

6. Преобразование с помощью алгоритма для сжатия и нормализации следующим образом:

а. Пусть 
$$f(x, a, b) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)}, & a \leq x \leq b \\ 1, & x > b \end{cases}$$
, рассчитать  $u=f(I,m,n)$ , где  $I$  значение выборки,  $m$  это нижний предел аномалии, указанный пользователем, и  $n$  это верхний предел аномалии, указанный пользователем.

б. Использование  $(u,0)$  в качестве UV-координат для выборки ПАЛИТРЫ, а затем вывода цвета выборки.

7. Поскольку графические процессоры могут отражать изменения в режиме реального времени, вводя различные значения  $m$  и  $n$ , верхний и нижний пределы аномалий можно настраивать в режиме реального времени. Как показано на рисунке 7d, f, использование

разных  $m$  и  $n$  привело к различным визуализациям на рисунке 7е, г. Каждый результат был сгенерирован менее чем за 10 миллисекунд на графическом процессоре GeForce RTX 3070.

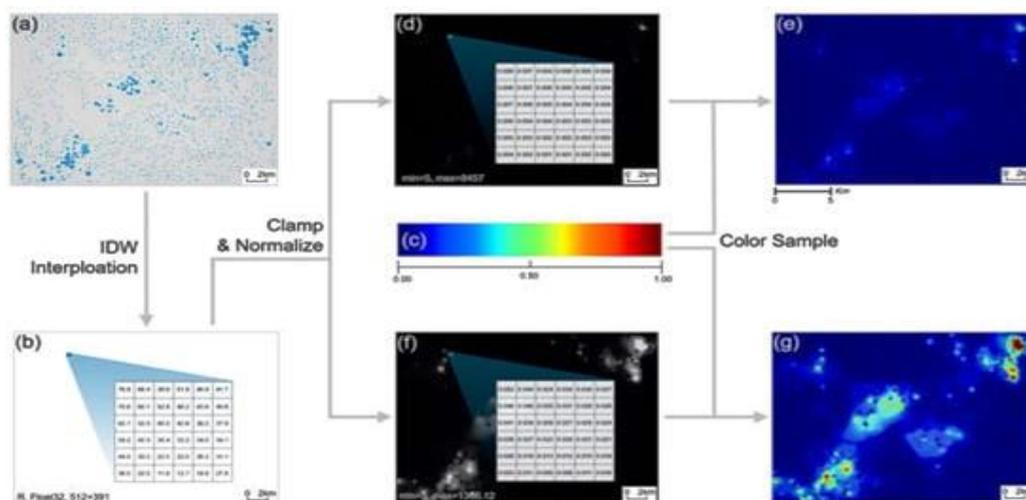


Рис. 7. Создание и визуализация динамической геохимической карты Cu в районе Чжунуо.

(а) Исходные точки отбора проб. Более крупные точки означают более высокое содержание меди.

(б) С помощью интерполяции IDW было сгенерировано изображение, содержащее содержание меди в каждом пикселе. (с) Цветная карта для раскрашивания изображения (б). (д) Сжатое и нормализованное изображение (б) с  $\min = 5$  и  $\max = 8457$ ; каждый пиксель - диапазон от 0.0 до 1.0. (е) Изображение (д) раскрашено цветной картой. (ф) Сжатое и нормализованное изображение (б) с  $\min = 5$  и  $\max = 1366,12$ . (г) Изображение (г) раскрашено цветной картой; области аномалий более очевидны (е).

### 3.2. Интерактивная геологическая карта (IGM).

На традиционных векторных картах данные о литологии хранятся в виде “атрибутов” в каждом векторном регионе, где литология, по сути, является текстовым описанием. Текст непрактично хранить в каждом пикселе из-за особенностей форматов растровых изображений. Однако, учитывая, что литология в одном регионе обычно ограничена, можно использовать перечисление и сопоставление ключ-значение для хранения литологии, и это основная логика интерактивных геологических карт. IGM ориентированы на достижение трех целей: (1) различение различных литологий на местности по цвету; (2) возможность контролировать видимость каждой литологии в отдельности; (3) возможность запрашивать литологию с помощью мыши в режиме реального времени.

IGM рудного района Чжунуо была создана и визуализирована с помощью следующих этапов:

1. Все литологии на исходной векторной геологической карте были подсчитаны и пронумерованы по порядку с помощью скрипта Python. Эти литологии были сохранены на карте ключ-значение, как показано в таблице 2 (эта таблица была сериализована в файл JSON в виде объекта, как показано на рисунке 8г).

Карта литологий с ключевыми значениями в рудном районе Чжунуо.

Number	Lithology Description
1	Diorite
2	Monzonite porphyry
3	N <sub>1</sub> —Biotite monzogranite porphyry
4	N <sub>1</sub> —Medium-coarse-grained porphyritic biotite monzogranite
5	E <sub>2</sub> —Upper Pana Formation
6	E <sub>2</sub> —Lower Nianbo Formation
7	N <sub>1</sub> —Medium-fine-grained porphyritic granite porphyry
8	E <sub>2</sub> —Medium-fine-grained biotite granodiorite
9	E <sub>1</sub> —Upper Dianzhong Formation
10	N <sub>1</sub> —Porphyritic monzogranite
11	E <sub>2</sub> —Medium-coarse-grained biotite monzogranite
12	N <sub>1</sub> —Medium-coarse-grained porphyritic biotite monzogranite
13	E <sub>2</sub> —Medium-fine-grained K-feldspar granite
14	E <sub>2</sub> —Upper Pana Formation
15	E <sub>2</sub> —Lower Nianbo Formation
16	N <sub>1</sub> —Porphyritic monzogranite
17	E <sub>2</sub> —Medium-coarse-grained biotite monzogranite

2. Растрировали литологии на векторной геологической карте. В процессе растрезации цвета были записаны в канал RGB изображения, а номера литологий из списка были записаны в альфа-канал, как показано на рисунке 8(b-1, b-2). Все четыре канала были в неподписанном формате int-8.

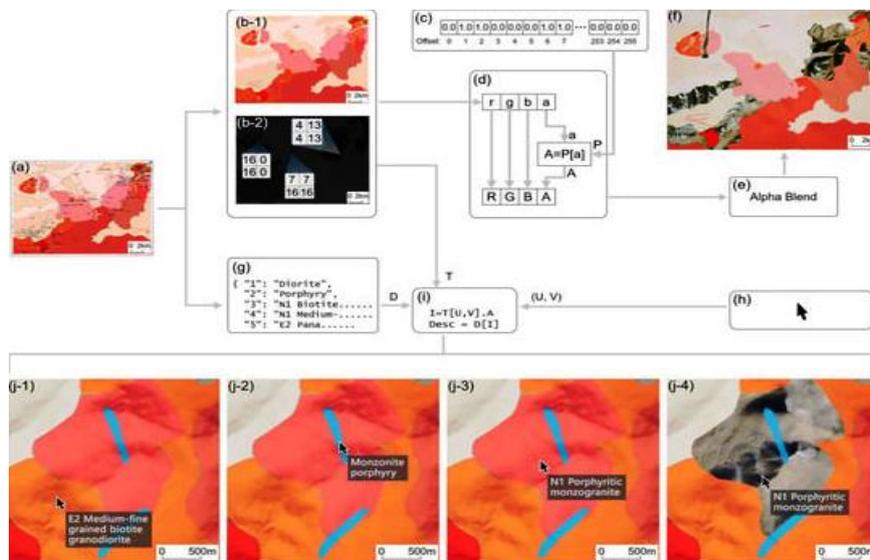


Рис. 8. Создание и визуализация интерактивной геологической карты Чжунуо.

- (a) Исходная векторная геологическая карта. (b-1,b-2) Изображение, преобразованное из (a) в канал RGB; (b-1) содержит цвет и альфа-канал, а (b-2) содержит перечисление литологии. (c) Изображение имело ширину 256 пикселей и высоту 1 пиксель для контроля видимости каждого типа литологии. (d) Алгоритм управления видимостью каждого пикселя. (e) Альфа-смешивание - для составления фоновых спутниковых снимков с IGM. (f) Итоговое изображение. (g) Объект JSON, содержащий перечислительное отображение описания литологии. (h) Координаты курсора мыши преобразуются в UV-координаты, соответствующие IGM. (i) Алгоритм для получения описания литологии под курсором. (j-1-j-4) При перемещении курсора информация о литологии под курсором отображается в режиме реального времени.

3. Карта региона Чжунуо представляет собой выпуклый четырехугольник, а не прямоугольник, и для рендеринга на GPU требуется, чтобы текстуры были прямоугольными. Поэтому данные пришлось скорректировать в перспективе и обрезать в OpenCV, чтобы заполнить все прямоугольное изображение, точно так же, как созданный DGM.

4. Было создано изображение шириной 256 пикселей, поскольку каждый пиксель соответствовал типу литологии (изображение LUT), как показано на рисунке 8c. Можно

управлять видимостью, изменяя значения пикселей. Например, сделать видимым “монцонитовый порфир” (нумерация которого равна двум в соответствии с таблицей 2) установив третьему пикселю слева от LUT, индекс которого равен двум в нумерации, основанной на нуле, значение 1.0 в линейном пространстве (что равно 255 в нелинейном пространстве без знака int-8). Напротив, чтобы сделать его невидимым необходимо установить значение 0.0.

5. Данные и LUT загрузили в виде текстур в видеопамять и использовали их при растривании слоев Cesium для Unreal. Точно так же, как и в DGM, для отображения данных в правильном пространственном положении нужно было вычислить UV-координаты каждого пикселя на 3D-глобусе для выборки данных, также используя “обратную билинейную интерполяцию” (объясняется ниже).

6. В материале слоев растривания Cesium для Unreal после выборки данных с UV-координатами с последнего шага был получен четырехкомпонентный массив, представляющий цвет RGBA в линейном пространстве. Среди них A представляет нумерацию литологии, соответствующую пикселю, который также является U-компонентом UV-координат для определения видимости этого типа литологии в LUT. Если значение выборки из LUT больше 0.0, то цветом выборки из данных является выходной сигнал компонента RGB. В противном случае цвет выводится на следующем слое, поскольку указанная литология невидима, как показано на рисунке 8d–f.

7. Для вычисления UV-координат положения курсора относительно четырех углов IGM использовали “обратную билинейную интерполяцию”. Использовали эти UV-координаты для выборки данных, чтобы получить нумерацию литологии в местоположении, точно так же, как на стороне графического процессора. С указанием нумерации литологий запросили карту ключ-значение в формате JSON, которую сделали выше, чтобы получить описание литологии, как показано на рисунке 8(j-1–j-4).

### **3.3. Обратная билинейная интерполяция.**

DGMs, и IGMs используют обратную билинейную интерполяцию для рендеринга текстур в правильных пространственных положениях. Обратная билинейная интерполяция - это алгоритм для вычисления UV-координат в любой позиции внутри выпуклого четырехугольника, если все известные нам координаты находятся в мировом пространстве. С помощью этого алгоритма можно сопоставить каждый пиксель внутри рудного района с пикселем в DGM или IGM. Определение обратной билинейной интерполяции выглядит следующим образом:

Рассмотрим выпуклый четырехугольник, состоящий из четырех вершин,  $a \rightarrow$ ,  $b \rightarrow$ ,  $c \rightarrow$ , и  $d \rightarrow$  в 2D-пространстве и пусть  $p \rightarrow$  обозначьте это следующим образом:

$$p \rightarrow = (p_1, p_2), a \rightarrow = (a_1, a_2), b \rightarrow = (b_1, b_2), c \rightarrow = (c_1, c_2), d \rightarrow = (d_1, d_2) \quad (1)$$

Затем УФ-координаты  $p \rightarrow$  заключаются в следующем:

$$v = \frac{2k_0}{-k_1 - \sqrt{k_1^2 - 4k_0k_2}}, u = \frac{p_1 - a_1 - d_1v + a_1v}{b_1 - a_1 + a_1v - b_1v + c_1v - d_1v} \quad (2)$$

Промежуточные переменные следующие:

$$k_0 = (p \rightarrow - a \rightarrow) \times (b \rightarrow - a \rightarrow) \quad (3)$$

$$k_1 = (b \rightarrow - a \rightarrow) \times (d \rightarrow - a \rightarrow) + (p \rightarrow - a \rightarrow) \times (a \rightarrow - b \rightarrow + c \rightarrow - d \rightarrow) \quad (4)$$

$$k_2 = (a \rightarrow - b \rightarrow + c \rightarrow - d \rightarrow) \times (d \rightarrow - a \rightarrow) \quad (5)$$

Обратная билинейная интерполяция, которую можно использовать в шейдере, создает математическую основу для точного пространственного отображения изображений на графических процессорах. В реализации системы сначала преобразовали координаты широты и долготы углов изображения в прямоугольные координаты Unreal в трехмерном пространстве, а затем передали эти координаты через коллекцию параметров материала (которая является контейнером в Unreal Engine для однородных переменных в шейдерах) в слоистый материал Cesium. В материале алгоритм обратной билинейной интерполяции был реализован с использованием высокоуровневого языка шейдеров (HLSL), где  $p \rightarrow$  представляет компоненты XY мировых координат пикселя и  $a \rightarrow$ ,  $b \rightarrow$ ,  $c \rightarrow$ , и  $d \rightarrow$  представляют собой XY компоненты угловых координат изображения, переданные из коллекции параметров материала. После запуска алгоритма были получены UV-координаты.

Обратная билинейная интерполяция также используется в запросе литологии в режиме реального времени в IGM. Но, в отличие от того же алгоритма, реализованного в шейдере, т.е. на стороне графического процессора, тот, который используется в этом запросе, реализован на стороне центрального процессора, и  $p \rightarrow$  представляет XY компоненты координат мыши, спроецированные на 3D-рельеф.

### **3.4. Композиция растровых изображений.**

При проведении геологоразведочных работ две карты, описанные выше, необходимо объединить со спутниковыми снимками в режиме реального времени. Cesium использует систему слоистых материалов Unreal Engine для достижения многослойного состава. В этом многослойном материале спутниковые снимки используются в качестве нижнего слоя, а затем IGM и DGM накладываются поверх него путем альфа-смешивания, как показано на рисунке 9. После создания композиции три слоя растровых изображений становятся окончательным изображением, которое затем наносится на 3D-глобус.

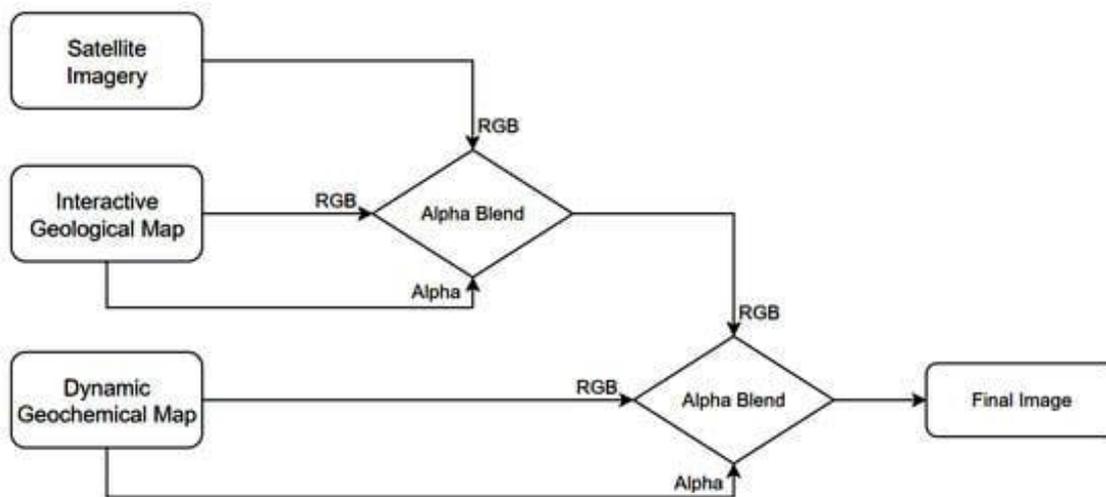


Рис. 9. Альфа-наложения растровых карт

#### 4. Прогнозирование в рудном районе Чжунуо.

Созданная новая программная система с множеством функций была использована при прогнозной оценке рудного района Чжунуо, в западной части Гангдзеского металлогенического пояса в Тибете (рис. 10).

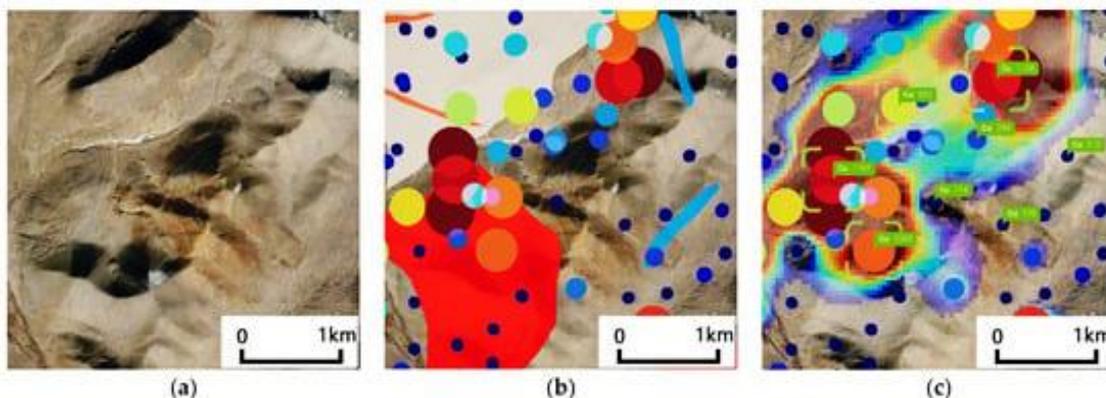


Рис. 10. Три примера режима отображения системы, визуализирующей данные рудного района Чжунуо.  
 (а) Только спутниковые снимки. (б) Спутниковые снимки, геологическая карта и пузырьковая диаграмма образцов меди.  
 (с) Спутниковые снимки, геохимическая карта и пузырьковая диаграмма образцов меди с содержанием в каждом выбранном образце.

Результаты ранее проведенных поисковых работ в районе были малоэффективны. Например, геохимические аномалии были относительно высокими, но после проверки бурением рудных тел обнаружено не было. Предлагаемый метод был применен для обработки геохимических данных рудного района на трехмерном рельефе. После анализа было обнаружено, что район Хуншань, где первоначально проводилось бурение, не был центром аномалии, а реальный центр аномалии располагался на северо-востоке (рис. 11).

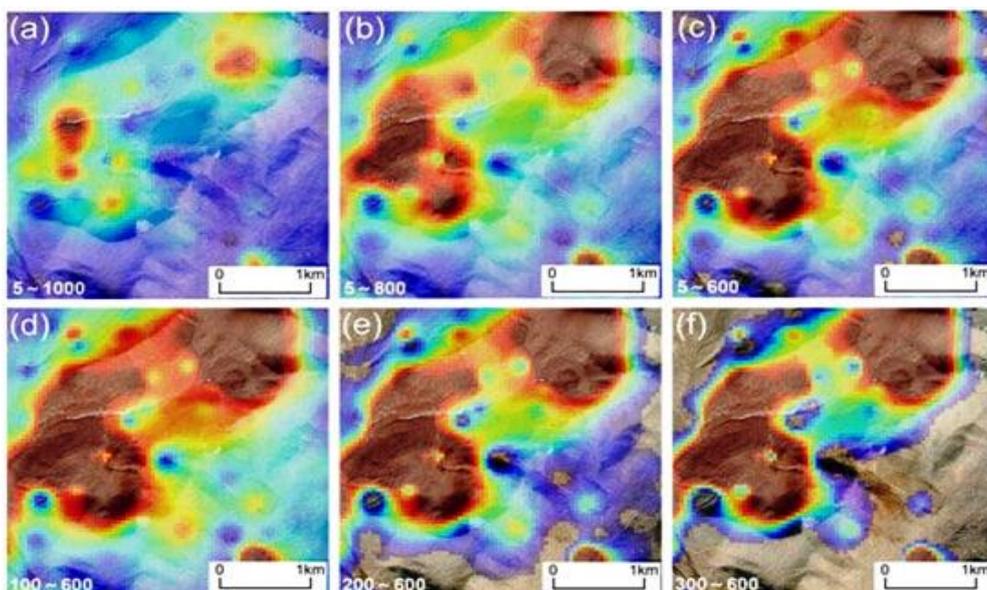
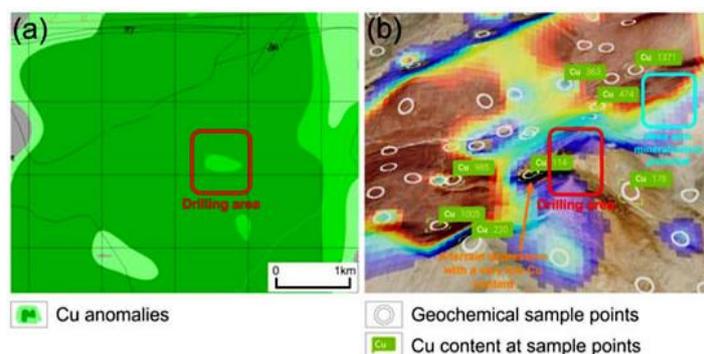


Рис. 11. Динамическая геохимическая карта Cu в Чжунуо.

Область с содержанием меди выше верхнего порога окрашена в малиновый цвет, а область, немного превышающая нижний порог, - в темно-синий. Область с содержанием меди ниже нижнего порога окрашена в прозрачный цвет. В (a) область аномалий слишком мала, что затрудняет анализ геохимических характеристик этой области. После настройки пороговых значений в режиме реального времени, поскольку карта менялась в режиме реального времени от (b-e), мы быстро нашли подходящую пару пороговых значений, чтобы четко охарактеризовать градиент концентрации в этой небольшой области, как показано на (f).

Поэтому при использовании традиционных методов определения аномалий следует всесторонне учитывать топографические эффекты и геологический фон (рис. 12).



Рису. 12. Центр геохимической аномалии.

- (a) Традиционная статическая геохимическая карта - имеет низкую контрастность на и не дает четкой демонстрации высот.  
 (b) Та же территория, визуализированная в интерактивной 3D-системе, устраняет недостатки традиционных геохимических карт.

Можно видеть, что использование этого метода может значительно повысить эффективность обработки геохимических данных.

## 5. Обсуждение и выводы.

Предлагаемый метод включает динамические геохимические карты и интерактивные геологические карты в растровом формате, соответствующем традиционным векторным геохимическим и геологическим картам, что позволяет проводить комплексное региональное металлогеническое прогнозирование в режиме реального времени на 3D-глобусе для определения взаимосвязей между рельефом, геологией, геохимией и металлогенией. С

помощью этого метода графические процессоры используются для корректировки геохимических аномалий в режиме реального времени, обеспечивая настройку во время оценки. Традиционно объединение географических данных завершается с помощью графики векторного формата в 2D. Данный метод использует алгоритм обратной билинейной интерполяции для точного наложения растровых изображений на 3D-глобус, позволяя представлять данные в виде растровых изображений, совместимых с GPU, вместо традиционной векторной графики, не совместимой с GPU, закладывая основу для высвобождения вычислительной мощности графических процессоров. Новая программная система, основанная на этих методах, была протестирована на практике при анализе рудного района Чжунуо, доказав свои преимущества перед традиционным программным обеспечением на основе векторной графики.

Был внедрен метод хранения региональных геологических данных с использованием растровых изображений, объектов JSON и обратной билинейной интерполяции что позволило реализовать геологические данные в IGM в режиме реального времени.

В настоящее время система реализует только визуализацию геохимических и геологических данных. Однако поисково-оценочные работы обычно требуют использования данных дистанционного зондирования, геофизических данных и т.д., которые также можно классифицировать как “количественные”. Таким образом, возможно расширение использования метод, внедрив DGM, для визуализации этих данных и, таким образом, расширить возможности системы.

Программная система, разработанная на основе метода, описанного в этом исследовании, в настоящее время позволяет комбинировать геохимические и геологические карты на 3D-глобусе для достижения комплексной оценки регионального прогнозирования в 3D-пространстве в режиме реального времени. В отличие от существующих программных систем, которые в основном полагаются на векторные данные, эта система полностью основана на растровых данных. Следовательно, она может в полной мере использовать вычислительные преимущества современных графических процессоров. На основе вычислительной мощности графического процессора была создана динамическая геохимическая карта, позволяющая проводить прогнозную оценку в режиме реального времени. Для объединения геологических данных была создана интерактивная геологическая карта, которая позволяет анализировать геологические данные на 3D-глобусе. Система впервые была применена для прогнозной оценки в рудном районе Чжунуо, продемонстрировав преимущества этого метода.

## II. ИНФОРМИРОВАННОЕ ЛОКАЛЬНОЕ СГЛАЖИВАНИЕ В 3D-НЕЯВНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ [4].

### 1. Введение.

Рассмотрение 2D-многообразий в 3D-пространстве связано с лежащей в основе геологической концепции, согласно которой события в геологической истории часто присутствуют в форме значительных изменений свойств горных пород, которые затем наблюдаются как четкие границы. Аналогичным образом, тектонические события часто приводят к образованию локализованных зон деформации, которые в случае хрупкой деформации приводят к развитию разломов и сетей разломов, которые часто могут быть аппроксимированы 2D-многообразиями для многих целей.

В зависимости от их назначения модели должны быть способны адекватно представлять конкретные структуры с различной степенью точности в определенных масштабах. Хотя желаемое разрешение может определяться поставленной задачей, доступные входные данные обычно охватывают широкий диапазон масштабов, от данных скважины (см) до масштабных геофизических измерений (км). Одной из основных проблем при создании геологической модели является интеграция локализованной информации разного качества в разных масштабах в единую модель, подходящую для конкретной цели.

Геологическое моделирование, в общем случае подразумевает представление 3D-поверхностей в пространстве, которые отражают изменения свойств горных пород, часто соответствующие историческим геологическим событиям. Эти поверхности могут быть смоделированы либо явно как трехмерные поверхностные сетки, либо неявно как изоповерхности непрерывного скалярного поля, интерполированные по всему доменному пространству.

Широко используемым неявным методом для 3D структурно-геологического моделирования является метод потенциального поля. Он объединяет информацию о точках геологического контакта (точках поверхности) и данные ориентации в универсальной системе координат для определения скалярного поля. Изоповерхности этого скалярного поля могут быть извлечены как явные геологические границы. Таким образом, несколько поверхностей могут быть неявно представлены одним скалярным полем. Несогласуемые соотношения моделируются комбинациями нескольких скалярных полей, в то время как разломы представлены функциями дрейфа в системе координат. Метод реализован в ряде программных пакетов и успешно применялся в различных тематических, в т. ч. прогнозно-металлогенических исследованиях.

Распространенной проблемой метода является тенденция создавать нереалистичные и нежелательные, в основном циклические артефакты моделирования. Эти артефакты являются результатом неявного процесса моделирования на основе данных, который не включает геологическую экспертизу в чистом виде. Существуют четыре основных решения этих проблем и улучшения моделей, созданных с помощью метода потенциального поля (рис. 1):

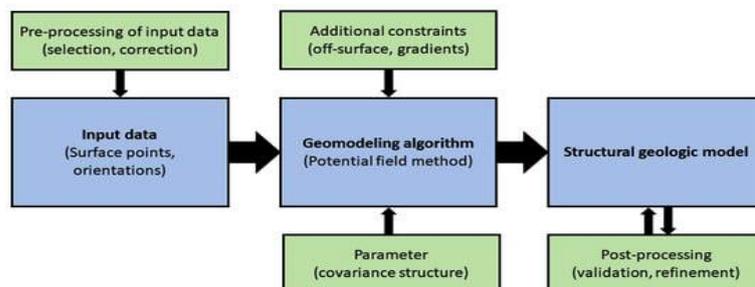


Рис. 1. Рабочий процесс геомоделирования с использованием метода потенциального поля (синий) и меры, принятые для улучшения моделей на разных этапах рабочего процесса (зеленый).

1. *Оптимизация параметров на этапе интерполяции.* Это означает корректировку используемой модели пространственной корреляции для улучшения модели. Это может быть либо используемая теоретическая ковариационная модель, либо ее параметры, особенно диапазон.

2. *Добавление дополнительных ограничений в качестве входных данных.* Это может включать добавление опорных точек вручную на основе геологических знаний или введение дополнительных типов данных, таких как ограничения неравенства или производные полей второго порядка.

3. *Методы постобработки для проверки моделей после вычислений.* Обычно создается набор реализаций и принимаются только жизнеспособные модели. Проверка модели может, например, основываться на геологических знаниях, топология или некоторая форма тестовых данных.

4. *Предварительная обработка:* результаты кригинга в значительной степени зависят от исходной конфигурации данных. Противоречивые данные, которые сильно различаются в разных масштабах, и неравномерно расположенные данные, которые могут привести к артефактам моделирования. Для достижения приемлемых результатов часто требуется надлежащая очистка, а также ручной отбор используемых данных.

Оптимизация применяемой ковариационной функции (1) не может надежно решить проблему возникновения геологически необоснованных артефактов, в то время как добавление новых ограничений (2) часто очень специфично для определенных вопросов моделирования и доступных данных и требует углубленных знаний алгоритма и его

реализации. Валидация модели при постобработке (3) полезна, но требует надежной и автоматизируемой стратегии валидации, а также подходящего количества надежных реализаций модели. Наконец, тщательная предварительная обработка входных данных может привести к утомительной ручной работе, а также поставить под угрозу воспроизводимость рабочего процесса.

В данном исследовании предлагается автоматизированный подход, объединяющий элементы (1) и (4), обобщая параметры методов, в частности, часть эффекта самородка ковариационной функции, либо с исходной информацией, либо с производными параметрами исходных входных данных и их конфигурации.

В геостатистике «эффект самородка» описывает поведение модели пространственной корреляции на малых (нулевых) расстояниях с запаздыванием. Существует два основных источника эффекта самородка: (а) мелкомасштабное изменение наблюдаемого явления, не отраженное доминирующей ковариационной структурой, или (б) ошибки измерения исходных входных данных. Оба эффекта в равной степени применимы к геомоделированию, где моделируемым явлением являются геометрические границы поверхности.

В классической статистике термин гетероскедастичность описывает изменение статистической дисперсии случайной величины. В рамках геостатистики обычно делаются предположения о стационарности статистических моментов, чтобы заменить многократные репликации измерениями в пространстве, связанными с помощью модели пространственной корреляции. Стационарность первого порядка относится к постоянному среднему значению, а стационарность второго порядка - к ковариации, зависящей только от вектора расстояния между двумя точками. Существует несколько методов решения проблемы нестационарности среднего значения в приложениях кригинга. Наиболее часто используется универсальный кригинг, кригинг с внешним дрейфом (KED) и регрессионный кригинг (RK).

Применение метода потенциального поля позволяет учитывать: (а) известные неопределенности различных типов входных данных и (б) мелкомасштабные вариации, зафиксированные высоколокализованной плотной выборкой, которые не могут быть разрешены в крупномасштабной модели (рис. 2). Локальное изменение «самородков» может определяться либо количественной неопределенностью входных данных о поверхности, либо параметрами конфигурации входных данных. Поскольку этот метод работает со скалярным полем, а не с реальным масштабом модели, локальная дисперсия самородков должна быть масштабирована относительно скалярного поля.

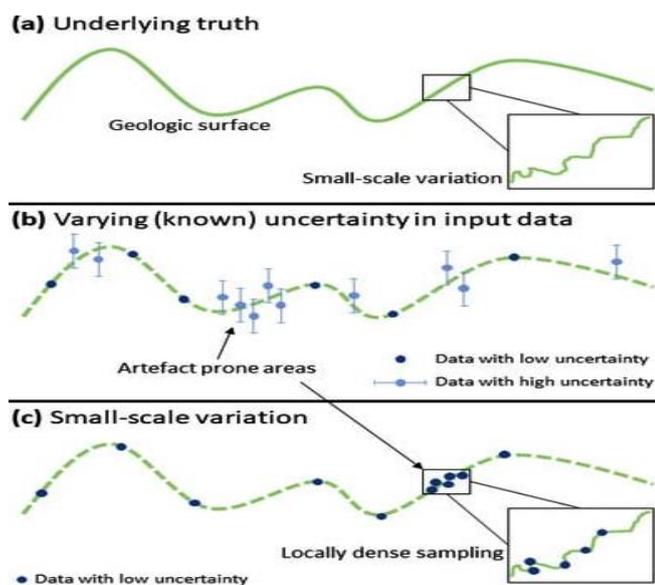


Рис. 2. Проблемы моделирования, решаемые с помощью информированного локального сглаживания: (а) Основополагающая истина с геологической поверхностью. (б) Входные данные с различной количественной неопределенностью. (с) Локально плотная выборка мелкомасштабных вариаций ниже желаемого разрешения модели.

Предлагаемый подход снижает точность результирующей модели, что означает ее локальное соответствие точкам данных. Хотя это, как правило, нежелательное поведение в классической геостатистике, часто требуются надежные и геологически обоснованные геоструктурные модели. Точное соответствие точкам данных менее актуально, особенно когда измерения содержат неопределенности или охватывают диапазон масштабов с более высоким разрешением, чем требуется для целей модели.

Предлагается три подхода к информированию о локальном сглаживании с использованием ручных, полуавтоматических и полностью автоматизированных методов в зависимости от доступных данных, для создания упрощенной геологической модели с различными конфигурациями входных данных, иллюстрирующей эффект локального сглаживания в 3D структурном геомоделировании.

## 2. Материалы и методы.

### 2.1. Обычный Кригинг.

Используемый здесь метод потенциального поля основан на методе кригинга. Чтобы проиллюстрировать эффект сглаживания, мы сначала создадим классическую обычную систему Кригинга. Обычный кригинг - наиболее часто используемая форма кригинга, основанная только на двух предположениях, что (1) среднее  $m$  случайная функция неизвестна, но постоянна и (2) что мы можем вывести действительную функцию вариограммы из доступных данных. Предиктор обычного кригинга  $Z^*_{\text{wok}}(x_0)$  о значении случайной функции  $Z(x)$  на месте  $x_0$  определяется как:

$$Z_{\omega_{OK}}^*(\mathbf{x}_0) := \sum_{i=1}^n \omega_i Z(\mathbf{x}_i) \quad (1)$$

для набора выборочных местоположений данных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Обычная система Кригинга, впервые представленная Matheron, представляет результирующие уравнения при оптимизации для минимальных отклонений оценок  $\delta_E^2$  для определения весов  $\omega_{OK}$ . Минимизация достигается путем определения функции, зависящей от этих отклонений, и члена, содержащего множитель Лагранжа, и установки его частных производных по весам равными нулю. Набор результирующих уравнений в матричной формулировке равен:

$$\begin{bmatrix} C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1) & \cdots & C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_i) & \cdots & C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1) & \cdots & C(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i) & \cdots & C(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_1) & \cdots & C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_i) & \cdots & C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^{OK} \\ \vdots \\ \omega_i^{OK} \\ \vdots \\ \omega_n^{OK} \\ -\lambda_{OK} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ C(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\lambda$  обозначаем множитель Лагранжа и  $C$  допустимую ковариационную функцию. Веса, полученные в результате решения этих уравнений, используются в обычном предикторе кригинга (Уравнение (1)) для вычисления оценки в любой заданной позиции  $x_0$ .

Здесь общепринятые обозначения обычного кригинга представлены с ковариацией  $C$ , поскольку это часто используется в реализациях метода потенциального поля. Его можно легко переписать для использования с функцией вариограммы & следуя соотношению, где  $h$  расстояние запаздывания и  $C(0)$  является ли полная вариативность процесса:

$$\gamma(\mathbf{h}) = C(0) - C(\mathbf{h}) \quad (3)$$

## 2.2. Эффект самородка и отфильтрованный Кригинг

Эффект самородка в геостатистической структуре является свойством модели пространственной корреляции. Существует два принципиально разных способа просмотра эффекта самородка. Традиционно предполагается, что измерения точны, но в моделируемом явлении есть мелкомасштабные вариации, которые не улавливаются доминирующей моделью пространственной корреляции. Это достигается путем введения прерывистого начала координат в теоретическую модель пространственной корреляции. В случае вариограммы это означает, что полувариантность на нулевом расстоянии запаздывания определена равной нулю, и, таким образом, исходные измерения точно выполняются при интерполяции по кригингу. Эта ковариационная модель с эффектом чистого самородка, где  $b$  - общая дисперсия процесса, затем определяется как:

$$C^{nug} := \begin{cases} b, & \text{for } |h| = 0 \\ 0, & \text{for } |h| > 0 \end{cases} \quad (4)$$

Альтернативно, эффект самородка можно рассматривать как ошибку измерения или шум. В этом случае полувариантность при нулевом запаздывании может иметь ненулевые значения, и, таким образом, измерения не обязательно выполняются точно. Применительно к кригингу это означает, что можно иметь интерполированные значения, отличные от исходных наблюдений в местах измерений, что приводит к термину отфильтрованный кригинг или кригинг с известной ошибкой измерения. На практике это может быть реализовано путем использования допустимой ковариационной функции с нулевым эффектом самородка и последующего добавления дисперсии шума к диагонали матрицы кригинга.

На рисунке 3 проиллюстрирована разница между обоими подходами на примере одномерной интерполяции. В действительности следует учитывать комбинацию обоих эффектов - мелкомасштабного отклонения и ошибки измерения.

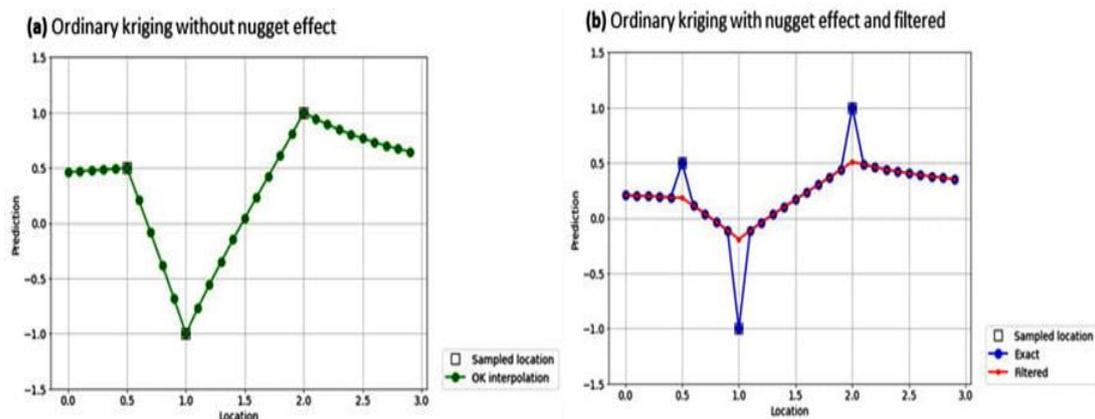


Рис. 3. Одномерная интерполяция по кригингу с диапазоном = 1 и порогом = 1.

Точками обозначены дискретизированные местоположения интерполяции. (а) Без эффекта самородка. (б) Эффект самородка 0,5. Синий: точный эффект самородка (мелкомасштабное изменение); Красный: отфильтрованный кригинг (ошибка измерения).

Можно видеть, что традиционный эффект самородка может приводить к разрывам в интерполяции в местоположениях данных в зависимости от дискретизации (рис. 3б, синяя линия), в то время как отфильтрованный кригинг (рис. 3б, красная линия) приводит к гладким результатам, но измерения не выполняются, и кригинг перестает быть точным интерполятором. Это означает, что результат интерполяции в выбранном местоположении не обязательно совпадает с результатом измерения в этом местоположении.

### 2.3. Локальное сглаживание.

Эффект самородка в его традиционной форме является частью вложенной структуры модели пространственной корреляции, будь то вариограмма или ковариационная модель. В типичных геостатистических приложениях оно моделируется вместе со всей структурой и, таким образом, влияет на полученную теоретическую модель, а впоследствии и на интерполяцию Кригинга глобально. В этом исследовании рассматривается только часть ошибки измерения эффекта самородка, позволяя корректировать поведение только на нулевом расстоянии запаздывания. На практике это достигается путем манипулирования диагональю избыточной матрицы кригинга:

$$\begin{bmatrix} C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1) + \sigma_1^2 & \cdots & C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_i) & \cdots & C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1) & \cdots & C(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i) + \sigma_i^2 & \cdots & C(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_1) & \cdots & C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_i) & \cdots & C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_n) + \sigma_n^2 & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Поскольку эта диагональ напрямую связана с точками входных данных, каждой точке входных данных может быть присвоено другое значение, что приводит к неоднородному распределению дисперсий, сравнимому со статистической гетероскедастичностью. Чтобы избежать путаницы в терминологии эффекта самородка, отфильтрованного кригинга и кригинга с известной ошибкой измерения, это локальное применение части ошибки измерения эффекта самородка называют локальным сглаживанием в контексте геомоделирования.

Рисунок 4 показывает влияние локального сглаживания в 1D с использованием обычной системы кригинга на синтетическую конфигурацию из девяти точек данных. Можно изменять применяемое сглаживание для каждой точки данных, на рисунке 4а со сглаживанием 0 или 0,5, на рисунке 4б с постепенным увеличением значений от 0 до 1,6 в зависимости от местоположения измерения.

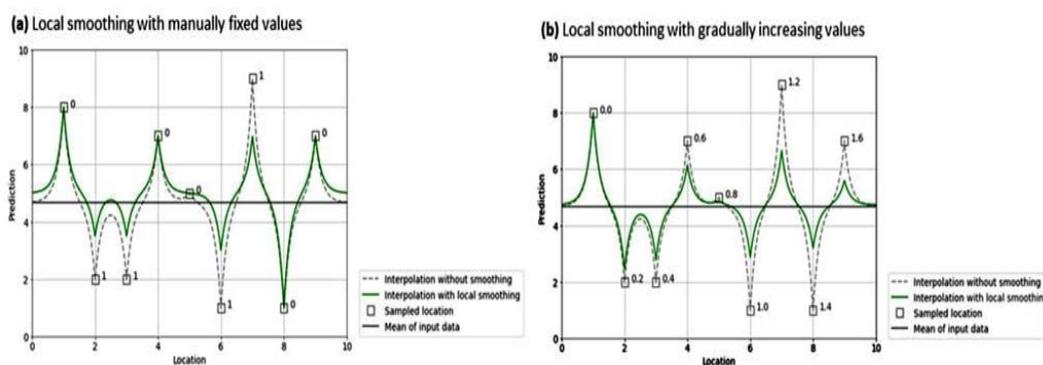


Рис. 4. Локальное сглаживание с экспоненциальной модели с диапазоном = 0,2 и порогом = 1.

(а) Локальное сглаживание исправлено вручную (либо 0, либо 1).

(б) Локальное сглаживание увеличивается в зависимости от местоположения (слева (0) направо (1.6)).

#### 2.4. Локальное сглаживание в геомоделировании.

В методе потенциального поля два типа входных данных, а именно точки поверхности и ориентации, используются для интерполяции безразмерного скалярного поля, которое неявно представляет несколько конформных геологических единиц. В геологическом смысле точки поверхности, означающие местоположения резких изменений свойств недр, на практике обычно границы геологических единиц, могут рассматриваться как временные данные. Результирующее скалярное поле может быть интерпретировано как представление относительного возраста. Ориентации - это данные о градиенте этого скалярного поля. Для объединения этих типов информации используется универсальная система кокригинга следующего вида:

$$\begin{bmatrix} C_{\delta Z/\delta u, \delta Z/\delta v} & C_{\delta Z/\delta u, Z} & U_{\delta Z/\delta u, Z} \\ C_{Z, \delta Z/\delta u} & C_{Z, Z} & U_Z \\ U'_{\delta Z/\delta u, Z} & U'_Z & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{\delta Z/\delta u, \delta Z/\delta v} & \omega_{\delta Z/\delta u, Z} \\ \omega_{Z, \delta Z/\delta u} & \omega_{Z, Z} \\ \mu_{\delta u} & \mu_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\delta Z/\delta u, \delta Z/\delta v} & c_{\delta Z/\delta u, Z} \\ c_{Z, \delta Z/\delta u} & c_{Z, Z} \\ f_{10} & f_{20} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Где  $C_{\delta Z/\delta u, \delta Z/\delta v}$  является ли градиент ковариационной матрицей,  $C_{Z, Z}$  является матрицей ковариации точек поверхности, а недиагональные записи содержат перекрестные ковариации и функции дрейфа из универсального кригинга. Аналогично обычному кригингу.,  $w$  относится к желаемым весам,  $\wedge$  содержит постоянные параметры расчетного дрейфа,  $c$  - ковариации и взаимные ковариации между входными точками (поверхностью и ориентациями) и целевым местоположением и  $f_{10}$  и  $f_{20}$  являются градиентом универсальной функции дрейфа. Сложные геологические объекты могут быть смоделированы либо путем введения функций дрейфа для разломов, либо путем объединения нескольких скалярных полей для несогласий. Сетки поверхности, представляющие геологические границы, могут быть извлечены из скалярного поля для визуализации и последующей обработки с использованием алгоритма маршевого куба.

Аналогично обычному примеру с кригингом, локальное сглаживание может быть применено к универсальной системе кокригинга. В этой работе фокусируются на данных о точках поверхности и, таким образом, манипулируют только диагональю подматрицы  $C_{Z, Z}$ , которая содержит ковариации данных о поверхности, оставляя другие части системы нетронутыми.

Ковариационная модель, используемая в универсальном кокригинге, остается неизменной, и предположение о стационарности второго порядка остается в силе, поскольку гетероскедастичность вводится только в местах измерений. Интерполированные поверхности (или, в общем, скалярное поле) могут контролируемым образом отклоняться от заданных

входных точек данных поверхности. В этом сценарии метод потенциального поля перестает быть точным интерполятором.

### ***2.5. Информативное локальное сглаживание.***

Можно локально сгладить геомодель на основе параметра сглаживания, определенного для каждой точки входных данных поверхности. Разумные значения для этого параметра можно определить ручным, полуавтоматическим и автоматизированным методом для информирования о локальном сглаживании.

#### *Информированное вручную.*

Локальное сглаживание можно использовать для ручной настройки геомодели. После вычисления модели нежелательным артефактам, которые связаны с определенными областями сложной конфигурации данных, таким как противоречивая информация или высокая плотность данных, может быть присвоено более высокое локальное сглаживание. Это сочетание предварительной и постобработки, как показано на рисунке 1, но предлагает довольно интуитивно понятный единственный параметр, который можно настроить вручную в итерационном процессе.

#### *Информированные данные.*

Геомодели часто создаются на основе данных из разных источников. Сюда входят скважинные, поверхностные и геофизические данные из нескольких источников, часто отбираемые в течение длительного периода времени с сильно различающимся качеством. Обычно данные консолидируются, оцениваются и отбираются перед геомоделированием, и иногда их приходится итеративно адаптировать, если результаты модели не проходят проверку качества. Это приводит к важному различию в воспроизводимости рабочих процессов: хотя этап интерполяции обычно легко воспроизводим с помощью предоставленных алгоритмов, параметров и материалов, предварительная обработка может включать утомительную ручную очистку данных, которая не всегда хорошо документирована и приводит к практически невозможным моделям.

Предложено заменить часть предварительной обработки данных присвоением значимых значений локального сглаживания на основе типа данных и источника. Эти значения могут быть выведены из (а) сообщений об ошибках измерений для конкретных методов и/или кампаний или (б) анализа и количественной оценки неопределенностей интерпретации, например, данных из скважин. Это позволяет полуавтоматизировать процесс обработки и отбора данных и стимулирует разработку полностью воспроизводимых рабочих процессов, которые включают все доступные источники данных.

### *Информированная конфигурация данных.*

Конфигурация данных оказывает сильное влияние на результаты кригинга. В лучшем случае это может быть уменьшено с помощью продуманной схемы отбора проб, что обычно означает измерения с регулярными интервалами, охватывающие всю область модели. В действительности геологические данные часто сильно локализованы, что приводит к образованию областей с высокой плотностью данных, например, вдоль скважин, на доступных обнажениях или вдоль сейсмических разрезов. Это одна из основных причин моделирования артефактов в методе потенциального поля. Локализованные данные могут противоречить крупномасштабной модели либо из-за мелкомасштабных вариаций, либо из-за высокой дисперсии из-за ошибок измерений.

Предложено использовать хорошо известную концепцию оценки плотности ядра (KDE) для вывода значений локального сглаживания. KDE - это непараметрический метод из статистики для оценки функций плотности вероятности случайных величин. В контексте конфигурации входных данных для геомоделирования это обеспечивает относительную меру плотности данных. Таким образом, можно применять высокие значения локального сглаживания к областям с высокой плотностью данных, которые особенно склонны приводить к артефактам моделирования, при этом точно соблюдая изолированные точки данных в областях с низкой плотностью данных с низкими значениями локального сглаживания. Для примеров в этой работе для оценки KDE используется ядро гаусса с автоматическим выбором полосы пропускания в соответствии с правилом Скотта. Это обеспечивает легко сопоставимый относительный показатель плотности данных, но другие ядра или полосы пропускания могут улучшить результаты для конкретных конфигураций данных. Это существенно отличается от члена избыточности в уравнениях кригинга, который уменьшает общий вес кластеризованных точек при интерполяции по кригингу. Информированное локальное сглаживание KDE позволяет при интерполяции создавать гладкие поверхности внутри кластеров точек, не точно следуя точкам входных данных.

### ***2.6. Масштабирование.***

Скалярное поле, интерполированное методом потенциального поля, является безразмерным полем, его значения несут только относительную информацию о единичной толщине и времени в геологическом смысле. Таким образом, значения локального сглаживания, независимо от способа их вывода, необходимо масштабировать относительно этого скалярного поля для получения разумных результатов. В общем случае масштабирование требует сопоставления скалярного поля с реальным пространством. В случае моделей низкой сложности мы можем вывести это соотношение из предварительного

результата модели, сравнивая единичную толщину и значения скалярного поля. Для моделей более высокой сложности этот подход справедлив только в том случае, если единицы имеют постоянную толщину.

В случае локального сглаживания с учетом KDE масштабирование не может быть точно определено, поскольку и скалярное поле, и KDE являются относительными свойствами. Для реализации GemPy предложено нормализовать KDE и использовать результирующие значения от нуля до единицы в качестве локального сглаживания в системе координат. Доказано, что это хорошо работает с моделями низкой сложности, для моделей высокой сложности может потребоваться итеративная корректировка на основе результатов.

### 3. Результаты.

#### 3.1. Модель с равномерно расположенными данными.

Представляем простую модель складчатой геологической структуры с хорошо ограниченными возможностями. Точки данных для построения модели, хотя и разреженные, расположены на регулярном расстоянии друг от друга и охватывают всю область модели. В общей сложности 36 точек используются для ограничения верха и низа одного интересующего объекта. Каждая граница складки определяется девятью точками входных данных на поверхность. Точки поверхности расположены на расстоянии 400 произвольных единиц друг от друга в направлении  $y$  и 200 единиц друг от друга в направлении  $x$ , что приводит к расстоянию вдоль шарнира примерно в 283 единицы. К шарниру сгиба для обеих моделируемых поверхностей была добавлена только одна ориентация, указывающая вверх.

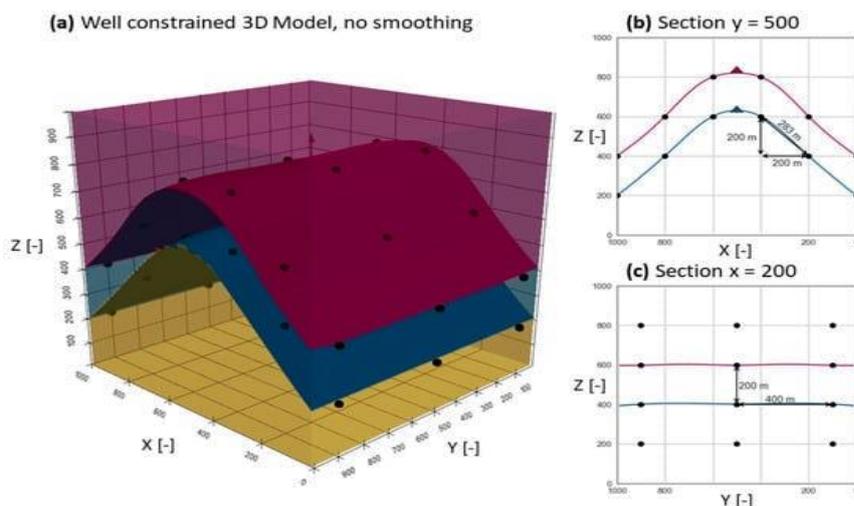


Рис. 5. Геомодель складчатого объекта с равномерно расположенными входными данными.  
(a) Вид 3D-модели. (b) Разрез при  $y = 500$ . (c) Разрез при  $x = 200$ .

Модель была создана методом потенциального поля в GemPy с использованием стандартной кубической ковариационной функции. На рисунке 5 показана конфигурация

входных данных, а также результирующая 3D-модель поверхности. Размер модели составляет  $1000 \times 1000 \times 1000$  единиц, вычисленных с разрешением  $50 \times 50 \times 50$ , соответствующий интервал сетки, таким образом, составляет 20 единиц.

*Модель со случайным шумом.*

Предположим, что модель на рисунке 5 является основополагающей истиной. Теперь можно добавить дополнительные точки поверхности со случайным шумом к верхней поверхности на обоих концах сгиба. К обоим конечным точкам можно приблизиться с помощью геометрической плоскости простой формы:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= 400 + x, \text{ for } x \in [0, 400], y \in [0, 1000] \\ f(x, y) &= 1400 - x, \text{ for } x \in [600, 1000], y \in [0, 1000] \end{aligned} \quad (7)$$

Двадцать пять дополнительных точек поверхности данных в произвольных координатах  $x$  и  $y$  были добавлены к каждой границе сгиба со стандартным отклонением в глубину ( $z$ ), равным  $v = \pm 25$ . Результирующая модель, вычисленная с нулевым сглаживанием, показана на рисунке 6. Один участок сгиба смоделирован адекватно, показывая лишь небольшие выпуклости для соответствия зашумленным данным, другой участок имеет геологически необоснованный артефакт, где интерполированная поверхность открывается к границе модели в круглой форме.

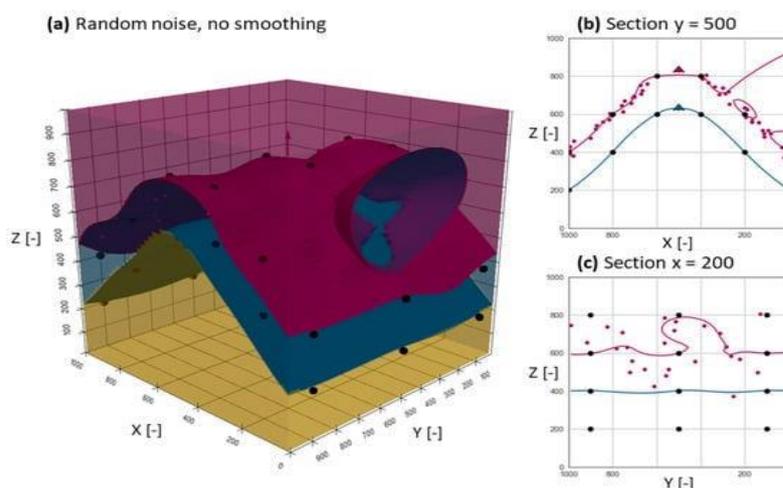


Рис. 6. Геомодель складчатого объекта.

К данным модели на рисунке 5 добавлено 50 зашумленных точек данных. Сглаживание не применялось.

(a) Вид 3D-модели. (b) Разрез при  $y = 500$ . (c) Разрез при  $x = 200$ .

Учитывая, что ошибка измерения во входных данных поддается количественной оценке и известна для всех типов измерений, можно применить локальное сглаживание. Предполагая, что наши 36 исходных точек поверхности точны, а добавленные точки данных поверхности имеют известное стандартное отклонение в 25 единиц, можно применить соответствующие значения локального сглаживания. В этом случае сопоставление скалярного поля и реального пространства проводилось на модели с хорошо ограниченными

возможностями (рис. 5), что привело к локальному сглаживанию в 0,54 для добавленных точек поверхности. Результаты для этой модели можно увидеть на рисунке 7. Несмотря на наличие небольших неровностей на интерполированной поверхности, нежелательные артефакты удаляются, а доминирующая структура моделируется разумно (для сравнения рис. 5 и 6). Исходные точки данных поверхности точно учитываются, поскольку они имеют нулевое локальное сглаживание (например, получены из более надежного источника/измерения). Пятьдесят зашумленных точек данных были добавлены к данным модели на рисунке 5. Исходные точки данных поверхности имеют нулевое локальное сглаживание, добавленные зашумленные точки данных имеют локальное сглаживание 0,54 (стандартное отклонение 25 в масштабе к скалярному полю).

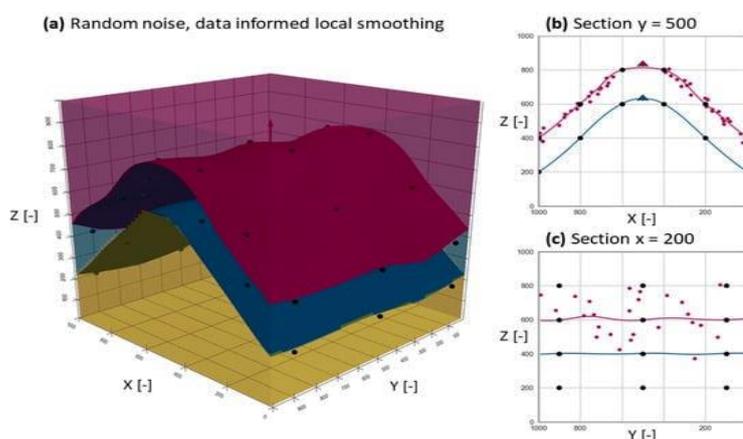


Рис. 7. Геомодель складчатого блока.  
(а) Просмотр 3D-модели. (б) Просмотр разреза при  $y = 500$ . Разрез (с) при  $x = 200$ .

#### *Модель с кластеризованным случайным шумом.*

Была создана третья модель для иллюстрации эффекта локальной кластеризации данных. Были добавлены два кластера точек по 25 дополнительных точек поверхности в каждом. Первый кластер расположен вокруг  $(400, 900, 800)$ , второй  $(200, 500, 600)$ , оба со стандартным отклонением 25 единиц во всех трех направлениях. Результирующая модель без сглаживания показана на рисунке 8. К данным из модели на рисунке 5 были добавлены два кластера из 25 зашумленных точек данных. Исходные точки данных поверхности имеют нулевое локальное сглаживание, добавленные зашумленные точки данных имеют локальное сглаживание на основе KDE. Результирующие артефакты сильно локализованы по сравнению с моделью, показанной на рисунке 6, но все еще сильно отклоняются от желаемого результата, образуя выраженные неровности, превышающие входное отклонение, а также нереалистичные отверстия на результирующей поверхности.

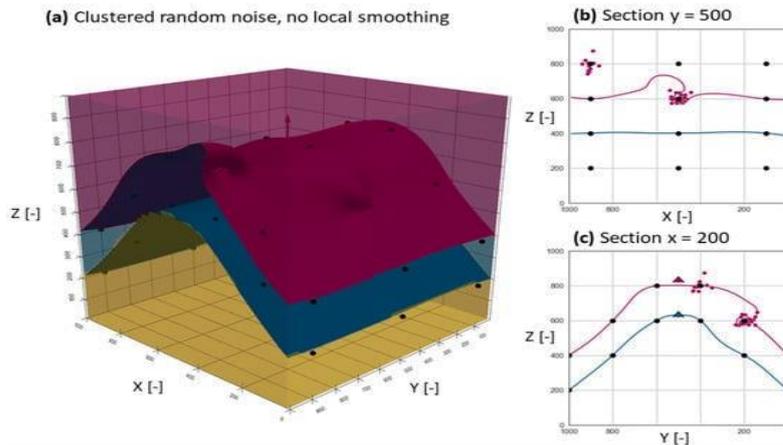


Рис. 8. Геомодель складчатого блока.  
(a) Просмотр 3D-модели. (b) Просмотр разреза при  $y = 500$ . Разрез (c) при  $x = 200$ .

Локальное сглаживание для этой модели было определено автоматически на основе конфигурации данных с использованием оценки плотности ядра. KDE для данной конфигурации данных был рассчитан с использованием гауссовского ядра и выбора полосы пропускания в соответствии с правилом Скотта. Результирующие значения KDE были нормализованы (рис. 9a,b); разделы результирующей локально сглаженной модели (рис. 9c, d). Кластеры точек имеют высокие значения KDE, что приводит к сглаживанию артефактов модели по сравнению с рис. 8, в то время как изолированные точки, расположенные на регулярном расстоянии, точно соблюдаются и имеют низкие значения KDE.

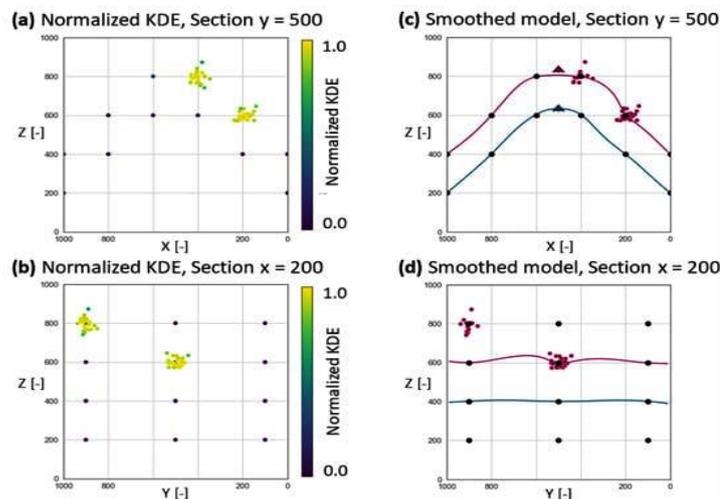


Рис. 9. Геомодель складчатого объекта.  
К данным из модели на рисунке 5 были добавлены два кластера из 25 зашумленных точек данных.  
(a,b) Разделы с нормализованным KDE входных данных точек поверхности.  
(c,d) Сечения результирующей модели с локальным сглаживанием с учетом KDE.

#### 4. Обсуждение и выводы.

В этом исследовании рассмотрена проблема моделирования артефактов в неявном 3D-геомоделировании, вызванных конфигурацией данных, качеством данных и изменчивостью

модели, зависящей от масштаба, с использованием параметра локального сглаживания для каждой входной точки, который может быть информирован различными способами.

В исследовании представлен метод, позволяющий интерполированным поверхностям при геомоделировании методом потенциального поля отклоняться от заданных входных точек данных поверхности на основе единственного параметра для каждой точки входных данных. В этом сценарии метод потенциального поля на основе Кригинга перестает быть точным интерполятором. Таким образом, в чисто математическом смысле снижается точность модели. Представленный метод является практическим применением в двух сценариях: простой случай, который непосредственно соответствует концепции фильтрованного кригинга, - это когда доступна количественная ошибка измерения или неопределенность для точек данных поверхности. Второй случай, более специфичный для геологического моделирования, связан с масштабом: особенно когда у нас нерегулярная конфигурация данных, эти измерения могут фиксировать мелкомасштабные изменения в одних частях модели, в то время как в других они могут отсутствовать вовсе. Это становится проблемой, когда негативно влияет на надежность модели и приводит к появлению артефактов моделирования. Локальное сглаживание предоставляет инструмент для создания более надежных моделей в требуемом масштабе.

В случае известных неопределенностей метод позволяет интегрировать данные из различных источников в единую структуру, сокращая объем ручного отбора данных, который часто приводит к невоспроизводимым результатам. Если неопределенности неизвестны, можно использовать локальное сглаживание с учетом плотности ядра, чтобы избежать артефактов, возникающих в результате нерегулярной и кластеризованной конфигурации данных. Текущим ограничением является масштабирование значения локального сглаживания относительно скалярного поля. Для моделей низкой сложности легко установить соответствие между скалярным полем и реальным пространством. С увеличением сложности модели получение такого отображения становится более сложным и потребует дополнительных шагов в рабочем процессе моделирования. Настройка этого параметра сравнима с настройкой ковариационной структуры, но она также неявно охватывает типичные этапы предварительной обработки данных (выбор данных) и сокращает объем необходимой постобработки. Это снижает сложность, повышает воспроизводимость и упрощает оптимизацию рабочих процессов.

Предлагаемый параметр локального сглаживания может быть интегрирован в структуру геофизической инверсии. Оптимизация для локального сглаживания в качестве параметра

модели решит проблему масштабирования и поможет получить надежные результаты инверсии.

Другие методы аппроксимации для подгонки интерполяций скалярного поля могут быть использованы для уменьшения появления и величины артефактов моделирования, возникающих в результате подгонки зашумленных и кластеризованных наборов данных. Три таких метода включают использование алгоритмов, ограничения неравенства и свертку интерполянта с помощью ядра сглаживания. Эти алгоритмы начинают подгонку интерполянта к минимальному подмножеству набора данных. Интерполянта вычисляется по точкам данных там, где они не были включены в это подмножество для вычисления ошибок между данными и текущей интерполянтай. Самые большие ошибки, превышающие некоторый установленный порог, добавляются к измененной интерполяции. Алгоритм останавливается, когда ошибок, превышающих этот порог, нет. Ограничения неравенства могут использоваться для определения диапазонов скалярных значений и ориентации с использованием известной неопределенности данных, в пределах которой можно найти решение для наиболее гладкой поверхности. Наконец, ядра сглаживания предоставляют метод для фильтрации высокочастотных геометрических изменений путем переключения ядер, используемых для подгонки интерполянта, с соответствующими ядрами сглаживания. Степень сглаживания регулируется путем изменения параметров ядер сглаживания без необходимости переоборудования интерполянта.

Сильные стороны метода локального сглаживания по сравнению с методами аппроксимации из области компьютерной графики заключаются в простой интеграции в существующее программное обеспечение для геомоделирования, доступном объеме справочной литературы по методам, основанным на кригинге, полном ручном управлении, прямой и простой для понимания связи между локальным сглаживанием и типичными исходными наборами данных из нескольких источников, а также полностью автоматизированном сглаживании для кластеризованных точек. Подход универсален, и для сложных наборов данных можно комбинировать информационные методы локального сглаживания.

Применение к 3D-геомоделированию метода потенциального поля является инновационным и полезным, поскольку получается инструмент для уменьшения геологически необоснованных артефактов моделирования. Настройка одного параметра вместо использования сложного сочетания взаимодействующих подходов улучшает удобство использования и воспроизводимость. Локальное сглаживание позволяет учитывать артефакты, вызванные изменением масштаба и неопределенностью измерений, но также

предлагает, если требуется, расширенное ручное управление. Основным ограничением в текущем состоянии является масштабирование параметра до безразмерного скалярного поля. Применение и ценность метода зависят от структуры и качества доступных наборов данных и определенного назначения модели.

Будущие исследования должны быть сосредоточены на дополнительных источниках информации о параметре локального сглаживания, полностью автоматическом масштабировании этих значений до скалярного поля, а также на применении в прогнозно-металлогенических целях с использованием реальных наборов данных. Уменьшение артефактов также способствует использованию метода в случаях, когда требуется несколько реализаций модели, например, в растущей области количественной оценки неопределенности.

### III. 3D-ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУДНЫХ РАЙОНОВ (Тасмания) [2].

#### 1. Введение

В последние годы широко признано, что для повышения эффективности регионального прогнозирования полезных ископаемых требуется лучшая идентификация и картографирование минеральных систем, поскольку они формируются в результате перемещения материалов (обычно флюидов) в трехмерных геологических средах. Важность картирования геологии в 3D становится все более очевидной. Чтобы сделать это картирование максимально точным, требуется интеграция геофизической информации со структурной интерпретацией результатов геологических наблюдений и картографирования.

В этом исследовании представлены результаты 3D-геолого-геофизического моделирования территории Тасмании компанией Mineral Resources Tasmania (MRT). Эта модель была создана на основе 3D-информации гравитационных и магнитных полей, что позволяет количественно определять геометрии геологических единиц на глубине с помощью статистически сгенерированных 3D-показателей чувствительности из нескольких геологических моделей, которые удовлетворяют геофизическим наблюдениям.

Эти региональные 3D-модели с высоким разрешением нацелены на наиболее важные рудные районы Тасмании. Модели представлены в виде группировки по западным и восточным террейнам Тасмании (рис. 1 и 2).

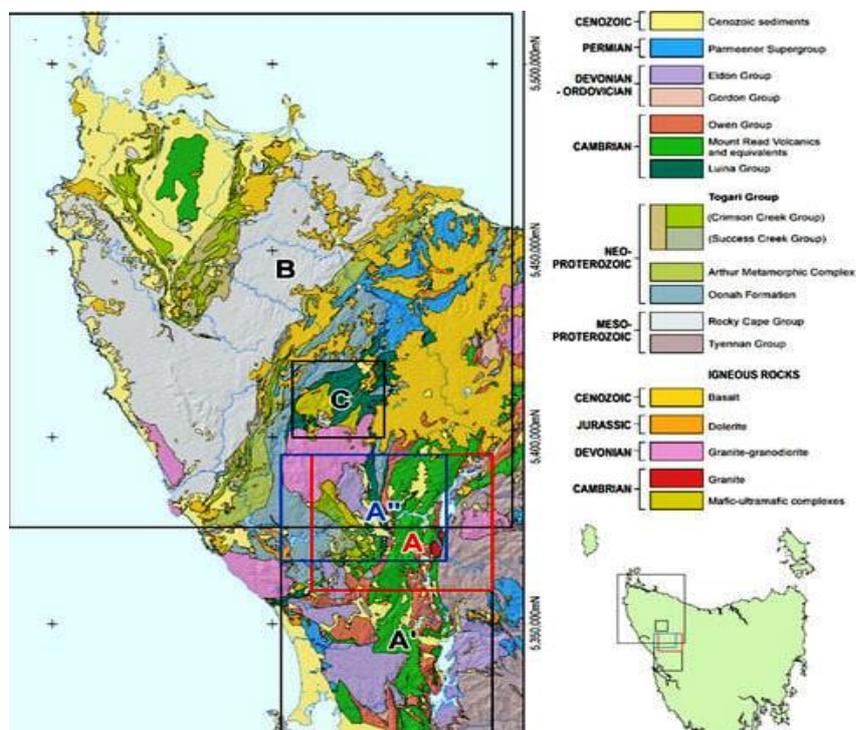


Рис. 1. Геология Западного террейна Тасмании.

А (красный, черный, синий прямоугольники) - регион Роузбери, 3D-модели Роузбери-Лайелла и Роузбери-Пьемана.  
 В и С - СЗ часть Тасмании, 3D-модели Хизлвуд-Луина-Варата.

Рисунок 1 иллюстрирует местоположения моделей Западного террейна, которые включают 3D-модель региона Роузбери и ее производные (3D-модели Роузбери–Лайелла, Роузбери-Пьемана).

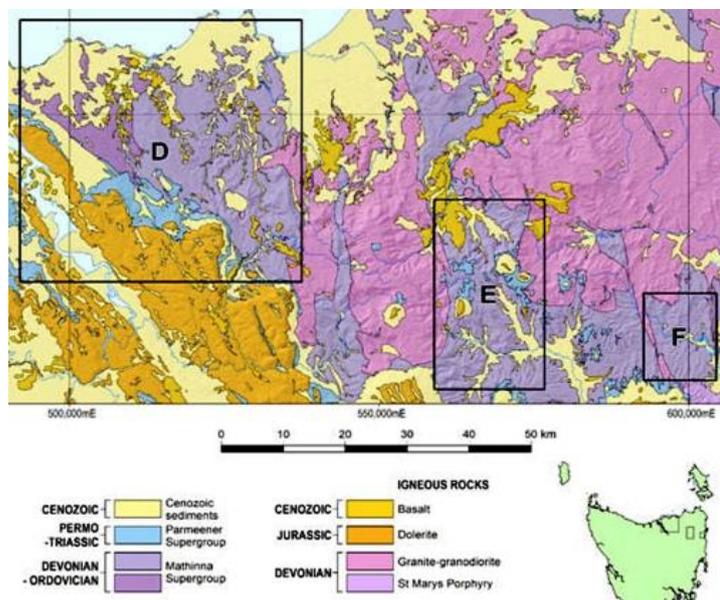


Рис. 2. Геология Восточного террейна Тасмании.  
D, E и F - 3D-модели Лебрина, Альбертон-Матинна и Скамандер соответственно.

Модели восточных террейнов были построены для анализа основных орогенных месторождений золота и Zn, Sn и Cu на СВ Тасмании. К ним относятся 3D-модели Лебрина, Альбертон-Матинна и Скамандер.

## 2. Геологическая обстановка.

Тектонически Тасманию можно разделить на Западный и Восточный террейны. Восточный (ЕТТ) характеризуется палеозойскими турбидитами и гранитоидами. Западный (WTT) имеет более длительную тектоническую историю и включает слои от мезопротерозоя до палеозоя и магматическую литологию. Эти два террейна испытали орогению Таббераббера среднего девона, и по-разному покрыты каменноугольными и современными осадочными и магматическими породами.

Геология и тектонические структуры *Западного Террейна* сложны из-за серии крупных тектонических событий и горообразований. Древнейшие литологические образования включают мезопротерозойскую группу выступов фундамента и корреляты, которые составляют толщу кремне-кластического шельфа мощностью ~ 10 км. Выступы фундамента, как правило, деформированы и преобразованы в зеленосланцевую фацию.

Неопротерозойские отложения рифтогенного типа и вулканические толщи (формации Уна, Саксес-Крик и Кримсон-Крик) предшествовали горообразованию Тиеннана, что

привело к направленному на запад надвигу крупных аллохтонных пластин основных и ультрамафитовых пород и меланжей, включающих аргиллиты, кремнезем и базальты (группа Луина). Реликты аллохтонных пластин включают ультраосновные комплексы Хизлвуд-Ривер, Уилсон-Ривер и Хаскиссон-Ривер. Орогенез Тиеннана также привела к метаморфизму эклогитовой фации в структурно сложном регионе Тиеннан, занимающем большую часть Центральной Тасмании и Артурскому метаморфическому комплексу - северо-трендовому поясу высокой деформации мощностью ~ 10 км, простирающемуся через СЗ Тасмании.

Постколлизийный магматизм среднего кембрия привел к образованию вулканического пояса Маунт-Рид (MRV), простирающегося через Западную и Северо-Западную Тасманию. MRV имеет сложную внутреннюю архитектуру, включающую кислые и основные лавы, синевулканические интрузии. MRV сопровождался внедрением субвулканических гранитов кембрия, включая граниты Мерчисона и Дарвина.

MRV перекрыт кремнистыми конгломератами Оуэн, которые перекрывают более древний кембрийский и протерозойский фундамент. Конгломерат Оуэн перекрыт преимущественно мелководными морскими карбонатами группы Гордон (от ордовика до нижнего силура) и кремне-кlastичками, с незначительным количеством известняка, толщей шельфа Элдонской группы от силура до нижнего девона.

Девонская табберабберанская орогенез вызвала складчатость регионального масштаба, возобновление архитектуры кембрийского базинального разлома и внедрение значительного объема сопутствующих посттектонических гранитов.

*Восточный террейн* сложен супергруппой Матинна. Турбидитовая толща от ордовика до раннего девона с совокупной стратиграфической мощностью, превышающей 10 км, является старейшей единицей, в Восточном тасманийском террейне (рис. 2). Кембрийские ультраосновные породы обладают геохимическим сродством с ультраосновными породами, Западного террейна), по геофизическим данным они лежат в основе большей части северной половины Восточного террейна. (ЕГТ). После двух крупных деформационных эпизодов во время орогенеза Таббераббера, в ходе которых Западная и Восточная Тасмания достигли своего нынешнего соседства, супергруппа Матинна подверглась вторжению гранитоидов девонского возраста, которые включают батолит Скоттсдейл (включающий граниты Томбстоун-Крик и Расселлс-роуд) и батолит Голубого яруса (включающий гранодиорит Пиенгана, граниты Поймена и Париж). Многие из этих плутонов характеризуются как I-тип, поскольку образовались в результате частичного плавления магматических исходных пород.

*Более молодые толщи горных пород.*

Породы фундамента как в Западном, так и в Восточном террейнах несогласованно перекрыты отложениями от каменноугольного до триасового возраста супергруппы Парминер, в которые широко вторглись юрские долериты, обычно мощностью в сотни метров. В поздне меловом береговом и оффшорном бассейнах развитие началось в результате рифтогенеза от Антарктиды в Тасмановое море. Эти бассейны заполнены терригенными отложениями и базальтовыми лавовыми потоками от мела до миоцена. Эти более молодые породы не являются значимыми объектами для разведки металлических полезных ископаемых.

*Металлогения.*

Тасмания обладает богатыми и разнообразными запасами полезных ископаемых. Массивные сульфидные месторождения полиметаллического кембрийского вулканогенного происхождения (VHMS), расположенные на вулканитах Маунт-Рид, более века обеспечивали прибыльную добычу полезных ископаемых, основными примерами которых являются объекты Роузбери (Zn-Pb-Ag-Au) и Маунт-Лайелл (Cu-Au). Второй крупный металлогенический эпизод возник в результате широкомасштабного девонского гранитоидного магматизма, в результате чего образовались крупные месторождения оловянных руд в WTT, на горе Бишофф и Ренисон Белл (оба из которых в разное время были крупнейшими месторождениями Sn в мире) и в значительной степени в ETT. Орогенное золото - это третий класс минерализации, распространенный в Тасмании, особенно в ETT, где к настоящему времени добыто более миллиона унций.

### **3. Методология инверсии и данные.**

Метод полностью ограниченной литологической совместной инверсии успешно достигается путем предварительного создания исходной геологической модели (называемой "эталонной моделью"), которая согласуется со всеми геологическими наблюдениями и точно учитывает наблюдаемый геофизический отклик. Методы Монте-Карло, используемые при моделировании чувствительности, используют очень подробные процессы изменения отдельных свойств или геометрии. Кроме того, точная начальная модель также гарантирует, что время, необходимое для исследования вероятностного пространства, сведено к минимуму, а инверсия сходится к приемлемому несоответствию.

#### **3.1. Геофизическая валидация эталонной модели.**

Используя методологию, проиллюстрированную на рисунке 3, сначала создается "эталонная модель" в GoCAD™. Модель включает геологические границы,

стратиграфические горизонты и разломы, которые соответствуют данным геологических карт, буровых скважин и поперечных разрезов (рис. 4А). Определенные таким образом объемы дискретизированы (рис. 4В) при подготовке к прямому и обратному моделированию с использованием модуля потенциальных полей GoCAD (код VPmg). VPmg решает уравнения возмущений, используя метод максимально крутого спуска, что приводит к высокой скорости инверсии. Во время инверсии степень соответствия оценивается по величине несоответствия хи-квадрат. Инверсия останавливается или завершается, если она достигает максимально допустимых итераций или дальнейших итераций, не уменьшает несоответствие.

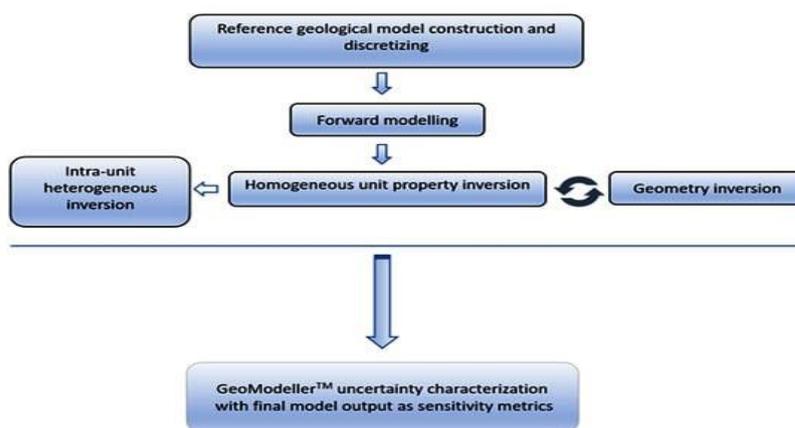


Рис. 3. Схема методологии создания 3D-модели и определения характеристик чувствительности.

Внутриплощадочная гетерогенная инверсия (GoCAD™) использовалась специально для 3D-модели Розбери-Лайелла для получения статистических данных о свойствах пород в мафитно-ультрамафитовых комплексах, которые использовались для последующего моделирования.

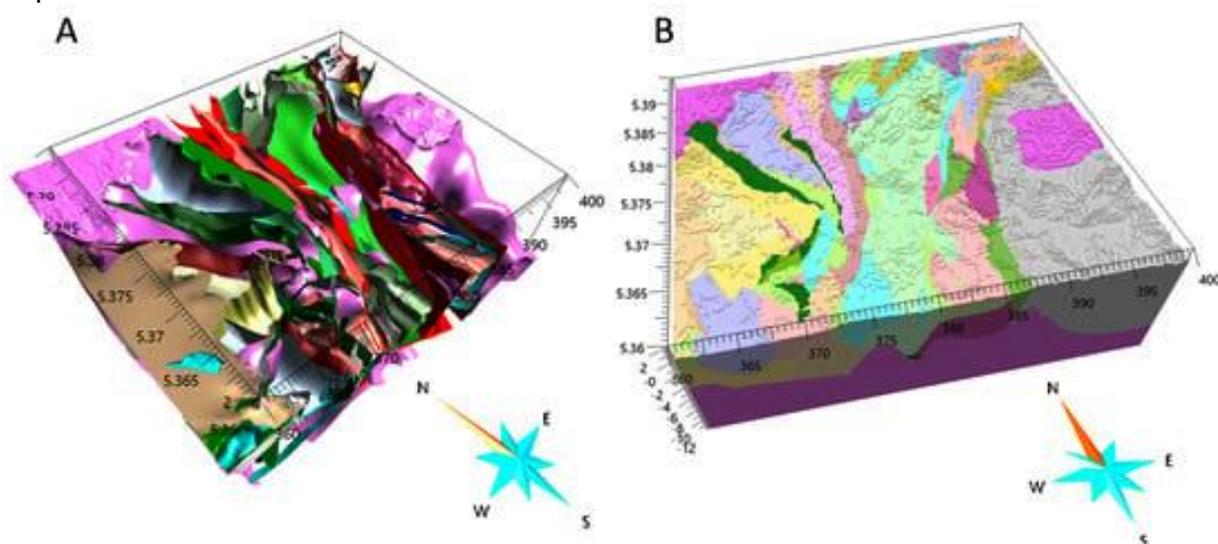


Рис. 4. (А) 3D-схема региона Розбери, иллюстрирующая литологию геологической модели: особенности включают гранитоиды (розовые поверхности) и сложную архитектуру сети разломов (оси  $x$  и  $y$  измеряются в метрах к востоку ( $\times 10^3$ ) и северу ( $\times 10^6$ ) соответственно, ось  $z$  указана в км. (В) Дискретизированная эталонная модель voxet региона Розбери.

Однородная (единое значение свойства для всего объекта) и ограниченная геометрическая инверсия проводится для обеспечения того, чтобы свойства объекта правильно отражали их объемную реакцию и обеспечивали разумные входные данные для следующего этапа моделирования. Однако полученная на данный момент 3D-модель является лишь обобщением “наилучшей оценки”, и, как хорошо известно, это решение не уникально.

Эталонная модель *voxel* от GoCAD™ (которая точно отражает наблюдаемый геофизический отклик) импортирована в GeoModeller™ для совместной гравитационной и магнитной инверсии и определения характеристик чувствительности.

### ***3.2. Совместное инверсионное моделирование и моделирование чувствительности.***

Чтобы устранить неоднозначность, присущую моделированию потенциальных полей, GeoModeller™ был использован как для уточнения инверсии, так и для исследования ряда аналогичных правдоподобных возможных моделей с целью оценки пространственной изменчивости достоверности элементов модели.

Используемый алгоритм стохастической разведки использует байесовский подход, моделирование марковской цепи методом Монте-Карло, генерирующий последовательность связанных моделей, начиная с исходной модели, вносящей небольшие “случайные” изменения в литологические границы и физические свойства. Затем предлагаемое изменение принимается или отклоняется, в зависимости, во-первых, от того, удовлетворены ли геометрические параметры, предназначенные для обеспечения геологической обоснованности (“Общность” и “Соотношение форм”), и, во-вторых, улучшено ли несоответствие геофизических характеристик или поддерживается ниже приемлемого порога. Физические свойства в пределах моделируемых единиц ограничены заданным распределением, оцененным из петрофизической базы данных.

Совместная гравитация и магнитная инверсия позволяют определять объем и глубину залегания. Однако перед этим проводится геологический тест, предшествующий (геофизическому) тестированию свойств. Этот геофизический тест проводится только в том случае, если предыдущий геологический тест (изменение границ) принят; другими словами, принятие изменения геологических границ запускает изменение свойств, которое затем тестируется.

По завершении цикла инверсии GeoModeller выполняет статистический анализ совокупности сохраненных моделей, которые воспроизводят наблюдения в приемлемой степени. Показатели чувствительности включают среднюю плотность и восприимчивость, полученные на основе накопленных принятых предложений/моделей инверсии. Порог вероятности, который фиксирует литологию, присвоенную этому вокселю, по крайней мере, в

99% приемлемых моделей, и наиболее вероятная модель, которая фиксирует литологию, наиболее часто присваиваемую местоположению вокселя модели из набора приемлемых моделей.

### ***3.3. Источники и подготовка данных.***

Потенциальный вклад поля от любого источника магнитного/гравитационного поля, расположенного за пределами (по бокам и вертикали) локальной модели, может влиять на эту модель и быть ошибочно отнесен к ее отклику при инвертировании данных. Для учета этого регионального отклика была построена грубая (размер ячейки 1 км×1 км×250 м) региональная модель, примерно в три раза превышающая масштаб локальной модели, и выполнена неограниченная инверсия. Результирующее распределение объектов воспроизводит региональные гравитационные и магнитные поля, возникающие из источников за пределами интересующего объема, в приемлемой степени. Программное обеспечение GoCAD™ позволяет включить локальную модель в региональную как часть рабочего процесса инверсии, и, таким образом, региональные тенденции учитываются при вычислениях прямой и обратной моделей. Впоследствии, для использования среды моделирования чувствительности, предоставляемой GeoModeller™, региональные градиентные и краевые эффекты были устранены путем удаления тренда и заполнения.

После неудовлетворительных попыток ранней инверсии был применен дополнительный шаг продолжения вверх на 200 м как к гравитационным, так и к магнитным данным, использованным при моделировании. Это привело к подавлению переоснащения, которое в противном случае привело бы к геологически неправдоподобным высокочастотным изменениям в инвертированных элементах модели.

Все геолого-геофизическое моделирование, в основном основано на региональном геологическом картографировании и сборе геофизических данных, проводимых MRT на протяжении многих десятилетий. Все эти данные находятся в открытом доступе на MRT. Во всех областях, где применялось 3D-геофизическое моделирование, используемые магнитные данные обычно передавались с интервалом между линиями 200 метров при просвете около 80 м. Наблюдения за гравитацией проводятся менее регулярно; однако расстояние между станциями около 1 км является типичным для областей, которые были смоделированы геофизически. Для каждой станции были рассчитаны полные значения аномалии Буге (СВА, т.е. с поправкой на рельеф). Как при любом гравитационном моделировании, применяемом к внутрикоровым особенностям в Тасмании, значения аномалий Буге, являются остатками, полученными из единой модели кора-мантия–океан. Это приводит к устранению градиентов,

возникающих на краю континента и связанной с ним топографии Мохо, которые в противном случае доминировали бы в наблюдаемом поле.

### 3.4. Физические свойства горных пород.

Исходные объемные физические свойства горных пород и допустимые диапазоны восприимчивости и плотности для всех моделей Западного и Восточного террейнов проиллюстрированы в таблицах 1-3. Они были получены из литературы и общедоступной базы данных физических свойств горных пород MRT, которые в дальнейшем совместно именуется “существующими значениями”.

Табл. 1.

Западный террейн, средняя плотность, основанная на модели (кг/м<sup>3</sup>).

Lithology	Existing <sup>1</sup>	Output <sup>2</sup>	1 $\sigma$
Jurassic Dolerite	>2.77	2.84	0.043
Crimson Creek Formation <sup>3</sup>	2.77–3.50	2.97	0.060
Devonian Carboniferous granites	2.60–2.62	2.60	0.006
Eldon Group Sediments	2.67–2.69	2.69	0.018
Gordon Group	2.67–2.72	2.72	0.013
Owen Group Sediments	2.67–2.72	2.72	0.020
Tyndall Group	2.68–2.74	2.69	0.015
Western Volcano—Sedimentary Sequence.	2.68–2.74	2.69	0.011
Farrell Slates	2.67–2.74	2.71	0.001
Que Hellyer Volcanics	2.72–2.79	2.79	0.010
Cambrian Granites	2.64–2.75	2.67	0.010
Andesites	2.71–2.82	2.75	0.020
Quartz Feldspar Porphyry	2.64–2.72	2.66	0.015
Central Volcanic Complex	2.71–2.75	2.71	0.006
Eastern Quartz Phyric Seq.	2.67–2.68	2.64	0.017
Sticht Range Beds	2.65–2.68	2.64	0.013
Mafic-Ultramafic Complexes <sup>4</sup>	2.75–2.97	2.81	0.047
Mafic-Ultramafic Complexes <sup>5</sup>	2.65–2.75	2.68	0.041
Mafic-Ultramafic Complexes <sup>6</sup>	2.55–2.65	2.62	0.048
Luina Group	2.78–2.82	2.79	0.018
Crimson Creek Formation	2.72–2.77	2.77	0.016
Success Creek Group	>2.74	2.73	0.013
Oonah Formation	2.67–2.72	2.69	0.005
Proterozoic Basement	2.67–2.72	2.69	0.011
Proterozoic Basement Magnetic <sup>7</sup>	2.75–2.80	2.77	0.013

Табл. 2.

Западный террейн, средняя восприимчивость, основанная на модели (SI×10<sup>-3</sup>).

Lithology	Existing <sup>1</sup>	Output <sup>2</sup>	1 $\sigma$
Jurassic Dolerite	>10	20	0.001
Crimson Creek Formation <sup>3</sup>	150	100	0.147
Devonian Carboniferous Granites	0	0	0.003
Eldon Group Sediments	0	0	0.000
Gordon Group	0	0	0.000
Owen Group Sediments	0	0	0.000
Tyndall Group	13	6	0.003
Western Volcano—Sedimentary Sequence	2	1	0.001
Farrell Slates	1	1	0.001
Que Hellyer Volcanics	4	1	0.002
Cambrian Granites	35	37	0.001
Andesites	4	4	0.001
Quartz Feldspar Porphyry	2	2	0.001
Central Volcanic Complex	2	2	0.002
Eastern Quartz Phyric Seq.	13	13	0.002
Sticht Range Beds	0	0	0.002
Mafic-Ultramafic Complexes <sup>4</sup>	0–50	24	0.038
Mafic-Ultramafic Complexes <sup>5</sup>	50–200	150	0.028
Mafic-Ultramafic Complexes <sup>6</sup>	200–400	194	0.035
Luina Group	12	10	0.054
Crimson Creek Formation	>65	11	0.011
Success Creek Group	0–3	0	0.001
Oonah Formation	0–6	1	0.002
Proterozoic Basement	0–2	0	0.001
Proterozoic Basement Magnetic <sup>7</sup>	30–35	40	0.030

Восточный террейн, средняя плотность, основанная на модели (кг/м<sup>3</sup>).

Lithology	Existing <sup>1</sup>	Output <sup>2</sup>	1 $\sigma$
Cenozoic Basalt	2.85–2.90	2.84	0.100
Jurassic Dolerite	2.80–2.90	2.79	0.020
Parmeener Supergroup	2.40–2.55	2.53	0.004
Devonian Carboniferous Granites	2.60–2.62	2.62	0.010
Granodiorites	2.70–2.75	2.70	0.001
Magnetic Granodiorites	2.71	2.74	0.010
Mathinna Supergroup <sup>3</sup>	2.73–2.76	2.75	0.010
Scamander Formation <sup>4</sup>		2.73	0.010
Lone Star Siltstone <sup>5</sup>		2.74	0.010
Cambrian Sediments	2.65–2.79	2.74	0.010
Mafic–Ultramafic Complexes	2.55–2.97	2.65	0.010
Proterozoic Basement	2.67–2.72	2.69	0.010

#### 4. Модель в масштабе Тасмании.

3D-геологическая модель Тасмании, стала первым подобным проектом в мире для целого континентального объекта (рис. 5).

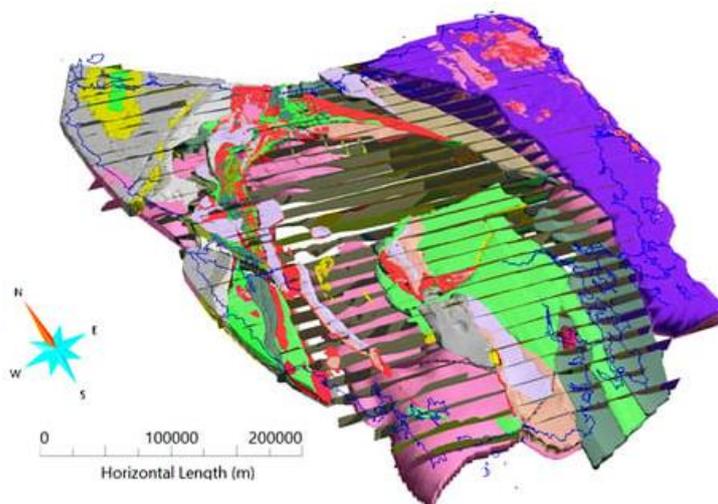


Рис. 5. 3D-геологическая модель Тасмании, включая поперечные разрезы.

Модель была построена на основе 51 интерпретирующего поперечного сечения, в основном с интервалом 10 км и ориентацией E-W, интерпретированного на среднюю глубину 7 км. Были выполнены разрезы по шести тектоническим элементам в зависимости от домена. Были обсуждены аспекты каждого элемента с точки зрения ассоциаций горных пород, тектонической обстановки, структуры, интрузий и минерализации. Дополнительные поперечные разрезы, показывающие большую детализацию и сложность, были разработаны для богатого оруденением центрального пояса MRV (разрезы E-W с интервалом 15 × 5 км и 2 разреза N-S).

Интерпретация особенностей на глубине на поперечных разрезах была в значительной степени основана на автоматическом картографировании краев потенциальных источников поля (“черви”). Профили многослойных червей, полученные по различным высотам

продолжения (таким образом, связанные с глубиной источника) и отнесенные по амплитуде, широко использовались для определения относительной формы, протяженности по глубине и непрерывности краев (например, разломов, интрузивных границ). Дополнительная геологическая информация включала модель Pasmenco Mt Read для Западной Тасмании, изопахиты гранита, полученные в результате предыдущего 2D-гравитационного и магнитного моделирования, а также региональные сейсмические разрезы отражения на суше и шельфе.

Каждый раздел интерпретировался в соответствии со стандартной легендой, сводящей геологию Тасмании к 28 единицам для моделирования. Нарисованные от руки разрезы были импортированы в 3D space для построения модели путем явной оцифровки и проволочного обрамления. Потребовалось несколько итераций для решения проблем, возникших по мере развертывания 3D-изображения, которые не были очевидны на 2D-разрезах, рассматриваемых изолированно.

Данные 3D *worm* (размер глубины определяется уровнем продолжения вверх) использовались для классификации и взвешивания граней, представленных в модели, по их непрерывности по глубине и длине. Предполагается, что выявленные таким образом более глубоко проникающие структуры, такие как разлом Хенти, обладают большей пропускной способностью для металлоносных флюидов. Сравнение с известными крупными минеральными системами VHMS, такими как Розбери, Маунт Лайелл, Хенти, Геркулес и Хеллиер, показало сильную связь со структурами северо-западного направления, сегментирующими MRV. Северный MRV, по-видимому, обладает наибольшим потенциалом для повторения аналогичных структурных положений; однако структуры северо-западного направления также распространены в MRV к югу от Маккуори-Харбор, представляя собой цели для дальнейших исследований.

Хотя близость к разломам в некоторой степени коррелирует с оруденением, связанным с интрузиями, в Западной Тасмании, включая гору Бишофф, Ренисон Белл и Эйвбери, анализ обнаружения краев показал, что контроль величины разломов и ориентации не так очевиден, как на месторождениях VHMS. Это говорит о том, что длина разлома не является столь критичным фактором, хотя пересечения разломов с гранитом остаются важными. Однако зона разлома Федерал-Бассетт с северо-западным направлением, на которой расположен Ренисон Белл, является продолжением коридора, связанного с месторождениями VHMS в Геркулесе и Хенти, что позволяет предположить, что эта структура была каналом для флюидов со времен кембрия, и пересечения разломов, взвешенные по величине, действительно имеют некоторую связь с минерализацией, связанной с интрузиями. Этот анализ выделяет аналогичные районы с большим поисковым потенциалом.

Орогенные месторождения золота в основном залегают в ЕТТ. В одной из наиболее плодородных зон, NNE-трендовом “Золотом коридоре”, золотая минерализация выглядит почти противоположной, но субпараллельной общей длине границы. Эта и другие взаимосвязи, наблюдаемые между известной минерализацией Au и общей длиной кромки, возможно, предполагают, что металлоносные флюиды мигрируют от структур потенциальных источников дальше в окружающие вмещающие породы. Однако некоторые скопления залежей золота, по-видимому, связаны с изолированными областями с высокой плотностью трещин, выходящими на более глубокие структуры, на что указывают высокие значения определения границ с взвешенным пересечением. Не все такие районы имеют выявленную минерализацию, а скорее – поисковый потенциал.

По большей части ключевые характеристики этой модели остаются в силе, появление новых данных и методов геофизической интерпретации определяет внесения существенных изменений в модель с учетом ее размера и сложности.

## **5. Регион Роузбери.**

В регионе к ним относятся 3D-модели районов Роузбери-Лайелла и Роузбери–Пьемана. Помимо включения более высоких уровней стратиграфической и структурной детализации, ключевым отличием было включение полностью трехмерного магнитного и гравитационного моделирования, что стало возможным благодаря усовершенствованному программному обеспечению. В сочетании с оценками физических свойств геологических единиц были обеспечены значительно более жесткие ограничения на геометрию модели.

3D-модель региона Роузбери (рис. 1А) простирается на 48 км (с запада на восток) и на 45 км (с севера на юг), охватывая некоторые из наиболее высокоминерализованных блоков земной коры на планете, при этом минеральная система полиметаллических руд Роузбери и месторождения Sn с замещением карбонатов в Ренисон Белл и Маунт Линдсей занимают лидирующие позиции среди многих других.

Модель региона Роузбери (рис. 4А) была построена аналогично 3D-модели Тасмании, но в масштабе, который позволил включить более мелкие детали из структурных и геофизических разрезов. Согласование этих разрезов потребовало применения геологического анализа для получения правдоподобной геометрии, соответствующей поверхности и данным бурения. Стратиграфические горизонты и поверхности разломов были построены индивидуально на основе их кривых следов на геологической карте и поперечных разрезах. Кривые были объединены в отдельные группы и им были присвоены коды горизонтов и разломов. Затем был использован алгоритм интерполяции для создания

триангулированных сетчатых поверхностей, представляющих каждый разлом и стратиграфический горизонт.

*Прямое и обратное моделирование.*

Прямое и обратное моделирование проводилось с использованием программного обеспечения VPmg<sup>TM</sup> на основе вертикальной призмы. Для региона Роузбери и последующих производных моделей магнитные и гравитационные наблюдения были продолжены на высоте до 200 м, чтобы устранить влияние коротковолновых характеристик, слишком мелких для практического представления в масштабе моделирования. При подготовке к прямому и обратному моделированию геометрия геологической единицы была дискретизирована в воксели размером 200×200×100 м для геофизического моделирования, в результате получилось 6 049 296 ячеек.

Была предпринята итерационная серия задач прямого магнитно-гравитационного и однородно-инверсионного моделирования (т. е. Однородного единичного значения свойства для всей единицы). Однородная инверсия точно настраивает исходные оценки магнитной восприимчивости и плотности объемных единиц, полученные в основном на основе выборочных измерений, поскольку последние могут быть не репрезентативными для всех стратиграфических единиц. Последующая инверсия геометрии (модификация геометрии) позволяет изменять геологические границы. Вносились небольшие изменения (~ 2% за итерацию) с соблюдением установленных геологических ограничений.

*Магнитный отклик*

В регионе Роузбери в магнитном отклике преобладают аллохтонные разломные пласты серпентинизированного ультраосновного материала (рис. 6).

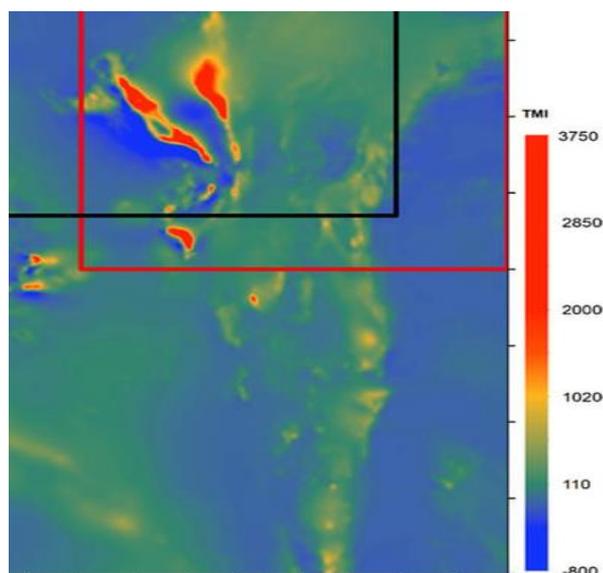


Рис. 6. Общая магнитная интенсивность (ТМІ, nT), подчеркивающая реакцию различных литологий, которые вносят вклад в локальное магнитное поле модели D.

Поэтому решили сначала изучить геометрию этих объектов на том основании, что там было меньше объектов, с которыми приходилось иметь дело, и что магнитные отклики более чувствительны, чем гравитационные, к глубине источника и падению. Разрешение геометрии этих единиц, таким образом, эффективно обеспечивает относительно прочную структурную основу для остальной части модели.

Объекты, демонстрирующие наибольшую магнитную реакцию, связаны с аллохтонными разломными пластами серпентинизированного ультраосновного материала (“ультрамафитовые комплексы”). Оси  $x$  и  $y$  измерены в метрах к востоку и северу соответственно. Эти измерения применимы ко всем последующим изображениям сетки.

Первоначальные результаты прямого и однородного моделирования показали разумное соответствие общим крупномасштабным наблюдаемым магнитным характеристикам, включая значения физических свойств горных пород в единицах измерения.

Рисунок 7 иллюстрирует магнитное остаточное несоответствие после однородной инверсии и модификации геометрии.

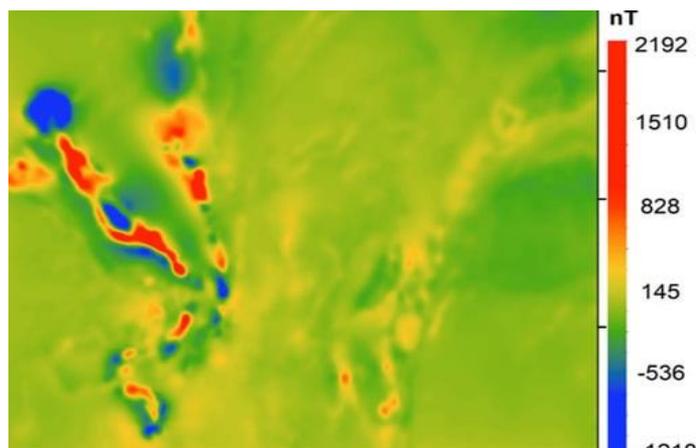


Рис. 7. Остаточное несоответствие ТМІ эталонной модели региона Роузбери (разница между наблюдаемыми и рассчитанными откликами; среднеквадратичное несоответствие 175,81 нТл).

Большие колебания кажущейся намагниченности в объемах, предположительно состоящих из ультрамафитов (из обнажения), предполагают, что очень большие изменения магнитной восприимчивости ультрамафитов, указанные петрофизической базой данных, часто являются пространственно согласованными.

Красные остаточные аномалии указывают на то, что требуется дополнительный магнитный материал для уменьшения несоответствия наблюдаемому отклику ТМІ. Напротив, синие остаточные данные указывают на то, что для уменьшения несоответствия требуется меньше магнитного материала.

Оставшиеся нерешенными масштабные несоответствия исходной модели forward в основном объяснялись дополнительным ультраосновным материалом на глубине в

конфигурации, соответствующей региональному структурному стилю (отрывы листрических надвигов). Напротив, более мелкие особенности магнитного остаточного несоответствия более уверенно приписываются объемам, которые являются магнитно аномальными как в геологическом, так и в геофизическом смысле.

*Реакция на гравитацию.*

Гравитационная аномалия Буге (рис. 8) была смоделирована с помощью того же рабочего процесса, что и для magnetics. Несоответствие гравитационных остатков после однородной инверсии (рис. 9) показало некоторые длинноволновые остаточные характеристики, которые в значительной степени объясняются неадекватной геометрией модели. Это в значительной степени объясняет неспособность гомогенной инверсии достичь расчетной огибающей шума гравитационных данных в 0,5 мГал. Примечательно, что несколько остаточных несоответствий связаны с областями недостаточного охвата гравитационных станций, что предполагает возможность неадекватной интерполяции гравитационных данных между разреженными точками наблюдения. Другие остаточные несоответствия с длинами волн, меньшими, чем размеры модельной единицы измерения, объясняются колебаниями плотности внутри единицы измерения, возможно, возникающими в результате альтерации или фациальных изменений.

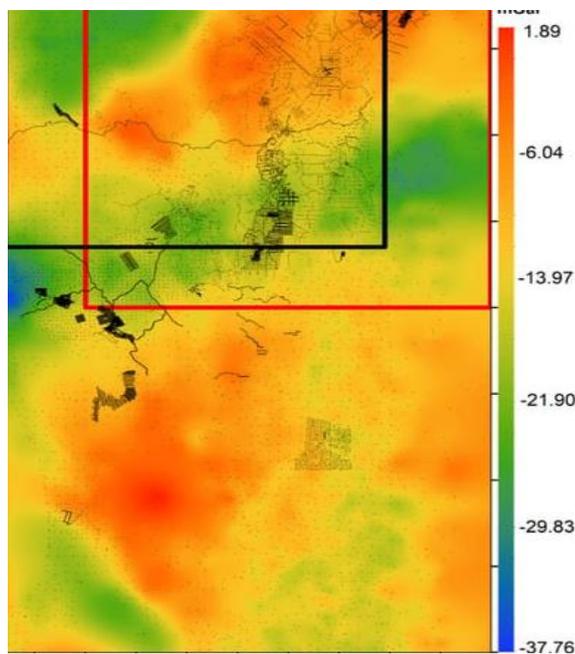


Рис. 8. Гравитационная реакция (MgAl; включая гравитационные станции, черные точки) различных литологий, которые вносят вклад в местное гравитационное поле. Красный и черный прямоугольники - т регион Роузбери и район исследований Роузбери-Пьеман соответственно. Полная сетка представляет пределы 3D-модели

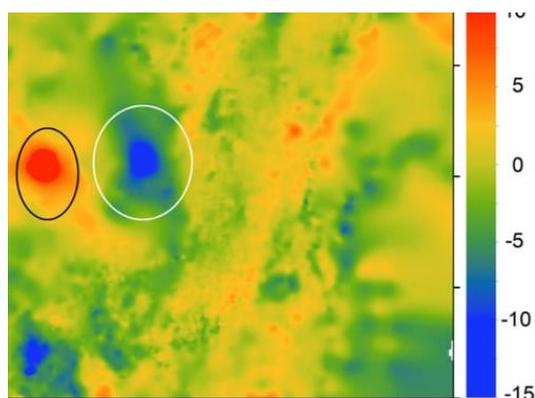


Рис. 9. Несоответствие остаточной силы тяжести эталонной модели региона Роузбери. Среднеквадратичное несоответствие составило 2,29 мГал. Длинноволновый отрицательный остаток (показан белым эллипсом) и положительный остаток (показан черным эллипсом), связанные с синклиалью Хаскиссона, указывают на неадекватную геометрию модели.

Отрицательный остаток амплитудой -10 мГал вблизи юго-западной синклинали Хаскиссона (рис. 9) был неофициально назван гравитационной аномалией притока ручья (ТСГА). Затем была проведена инверсия геометрии в фиксированных рамках, определяемых магнитными единицами (в основном мафитно-ультрамафитовыми комплексами в окрестностях ТСГА). Это привело к существенному изменению исходного девонского гранитного массива (рис. 10), при этом повторно смоделированная интрузия поднялась на ~ 1000 м от поверхности и пересекла как ультрамафиты, так и карбонаты группы Гордона. Оба сценария имеют потенциал для образования минерализации основными металлами, особенно никелем и оловом. В более широком смысле, контролируемая гравитацией инверсия геометрии привела к тому, что на глубине девонский гранит был существенно уменьшен в объеме и заменен породами фундамента неопротерозоя. Однако девонский гранит, как правило, был более мелким (т. е. ближе к поверхности) и с большим рельефом.

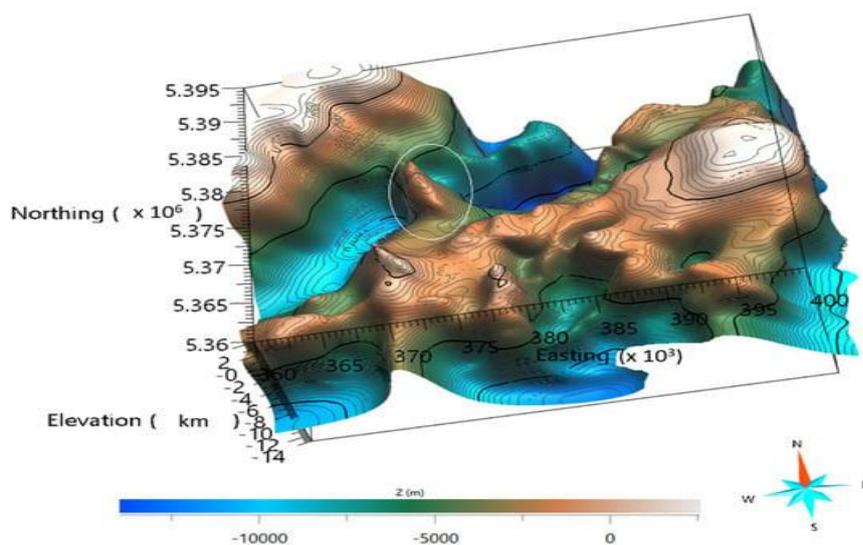


Рис. 10. Геометрия девонского гранита низкой плотности - изменена путем инверсии для учета отрицательного остаточного содержания 10 мГал. Это имело форму хребта, лежащего в основе этого региона (белый эллипс). Глубина до этого гребня в самом мелком месте оценивается примерно в 1000 м.

Впоследствии район TCGA стал объектом дальнейших исследований. В общей сложности вблизи TCGA были установлены 181 новая гравитационная станция. Эти новые данные подтвердили вероятность наличия в этом месте скопления материала низкой плотности, который был интерпретирован как гранит, возможно, вторгающийся в мафитно-ультрамафитовые комплексы и/или карбонаты группы Гордона. Однако, поскольку ядро TCGA по-прежнему определялось лишь несколькими гравитационными станциями, компания Yunnan Tin, у которой была лицензия на разведку в этом районе, получила более подробные гравитационные данные (с интервалом  $\sim 100$  м), чтобы подтвердить его местоположение и характер. Эти новые данные были использованы для последующего моделирования, описанного ниже.

### ***5.1. Район Роузбери-Лайелла.***

3D-модель Роузбери-Лайелла (рис. 11) расширила модель региона Роузбери на 30 км южнее, охватив основную минеральную систему Cu-Au в Маунт-Лайелл и никелевую систему в Эйвбери на общую протяженность 48×75 км. Геологические единицы, в основном такие же, как для региона Розбери, и их геометрия аналогично определена в результате повторного синтеза более ранних моделей и структурных интерпретаций. В структурную основу модели были внесены изменения. Например, граница между регионом Тиеннан и вулканами Маунт-Рид/впадиной Дандас (“Окраина Тиеннана”) была интерпретирована в 3D-модели из потенциального месторождения “вормс” как разлом, уходящий на восток. 3D-модель рудника Rosebery, показывает западный спад окраины. Последняя интерпретация была предпочтительнее для модели Розбери–Лайелла из-за неоднозначности источников типа “червь” и их подверженности помехам в случаях множественных источников и сложной геометрии. Были внесены дополнительные изменения в геометрию разлома Кинг-Ривер (KRF), расположенного в юго-восточном секторе модели. В отчете MRT высказано предположение, что (KRF) является крупным разломом понижения с листовым западным погружением, основанным на перевернутом характере западной части синклинория Кинг-Ривер, что указывает на перекрытие крупным надвиговым разломом, интерпретируемым как KRF.

Потребовалась значительная работа для создания 3D-поверхностей, описывающих этот сложный рельеф. Построение геологически обоснованных стратиграфических поверхностей и поверхностей разломов в том масштабе, который был предпринят, было трудоемким и отнимало много времени. После этого модель была дискретизирована в воксели размером 200×200×100 м для геофизического моделирования, в результате чего получилось  $\sim 10$

миллионов ячеек. Была выполнена итерационная серия задач обратного магнитного и гравитационного моделирования.

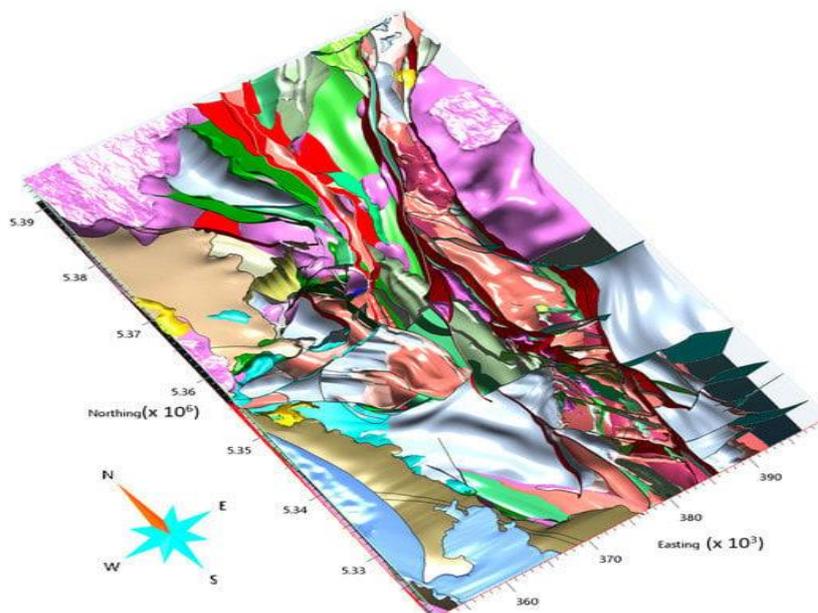


Рис. 11. Трехмерная схема, иллюстрирующая сложность 3D-геологической модели Розбери-Лайелла, самой важной минеральной провинции Тасмании. Литологические поверхности представлены разноцветными поверхностями, гранитами (розовые) и архитектурой сети разломов (красные и синие).

#### *Магнитный отклик.*

Магнитный отклик модели Розбери-Лайелла после однородной инверсии в целом согласуется с наблюдаемыми магнитными характеристиками, указывая на правдоподобную геометрию первого порядка для мафит-ультрамафитовых комплексов и кембрийских гранитов, которые являются доминирующими в магнитном отношении образованиями. Однако как длинноволновые, так и коротковолновые особенности, остающиеся в постинверсионном магнитном остаточном несоответствии (рис. 12), указывают на неразрешенные геометрические и внутрипластовые изменения состава, особенно в отношении ультраосновных комплексов, как это было обнаружено в регионе Розбери.

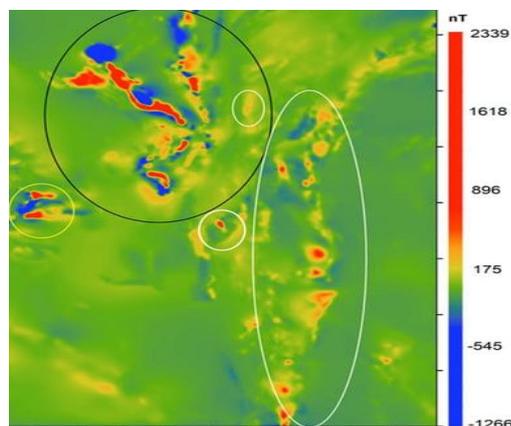


Рис. 12. Остаточное несоответствие ТМІ эталонной модели Розбери-Лайелла после однородной инверсии (среднеквадратичное несоответствие 143,65 нТл).

Черные и желтые эллипсы представляют крупномасштабные особенности, связанные с ультраосновными комплексами, что предполагает существенные вариации состава или неадекватную геометрию модели. Белые эллипсы подчеркивают более мелкие особенности магнитного остаточного несоответствия и с большей уверенностью приписываются объемам, которые являются магнитно-аномальными как в геологическом, так и в геофизическом смысле- система изменения магнетита (белый эллипс).

Эти проблемы были исследованы с помощью дальнейших этапов инверсии, позволяющих изменять объемы мафитно–ультрамафитического блока как геометрически, так и неоднородно (т. е. изменение восприимчивости внутри блока). Результаты этого цикла инверсий проиллюстрированы на рисунке 13, показывающем внутриплощадочные композиционные и геометрические изменения ультраосновной геометрии (т.е. добавление ультраосновного материала) к западу от синклинали Хаскиссона. Этот результат подтверждается инвертированными электромагнитными данными (VTEM), показывающими проводник формирования, соответствующий измененной геометрии ультраосновы и расширению ультраосновного комплекса под кайнозойским осадочным покровом. С геологической точки зрения это можно объяснить клиновидным ультрамафитовым надвигом в контакте с разломом групп Элдона, Гордона, Оуэна и Тиндалла (рис. 17).

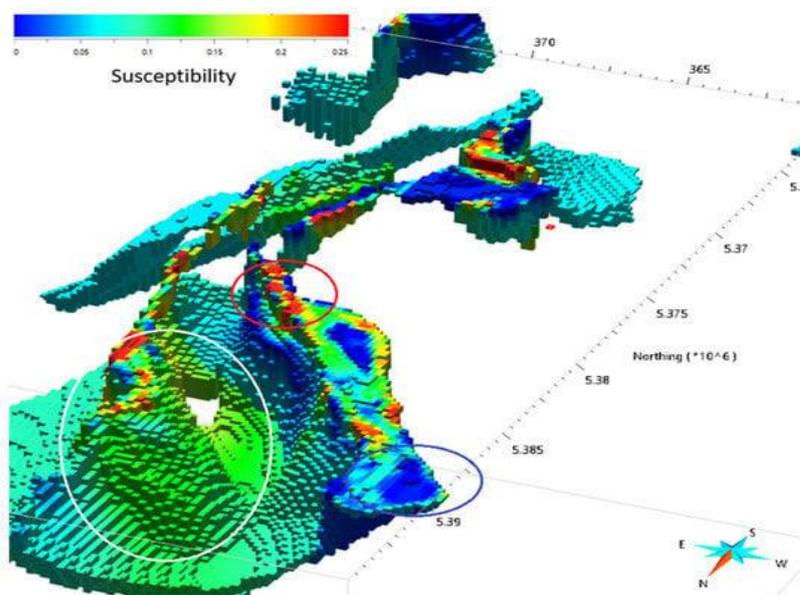


Рис. 13. Воксельная модель, представляющая ультраосновные образования в северной половине 3D-модели Розбери–Лайелла после гетерогенной инверсии. Три магнитно различимые единицы. Черный эллипс - область низкой чувствительности, белый - область средней чувствительности, а красный - область высокой чувствительности (SI).

Предыдущее моделирование региона Роузбери выявило значительные колебания кажущейся намагниченности в пределах ультрамафитовых объемов. Результаты гетерогенной инверсии показывают, по крайней мере, три магнитно различных образования в пределах

ультраосновных литологий (рис. 13). Они были определены отдельно при последующем моделировании (табл. 2). Более мелкие особенности магнитного остаточного несоответствия более уверенно приписываются объемам, которые являются магнитно-аномальными как в геологическом, так и в геофизическом смысле.

*Реакция на гравитацию.*

Низкие значения силы тяжести Буге связаны с девонским гранитом на поверхности или вблизи нее. Эти гранитные сигнатуры можно отчетливо увидеть (рис. 8) в северо-западном углу исследуемой территории (гранит Мередит) и в северной половине модели они простираются с северо-запада на северо-восток. Более длинноволновые максимумы гравитации, представленные более плотной литологией, расположены как в южной, так и в северной частях исследуемой территории.

Результаты прямого и однородного гравитационного моделирования показали разумное соответствие общим крупномасштабным наблюдаемым магнитным характеристикам, включая значения физических свойств горных пород в единицах измерения.

Рисунок 14 показывает несоответствие гравитационных остатков после однородной инверсии и модификации геометрии. Длинноволновые отрицательные остатки (от 8 до 10 мГал) расположены вдоль западной границы модели. Предположили, что они связаны с немагнитным гранитом кембрия с плотностью  $\sim 2,60 \text{ кг/м}^3$ . Напротив, длинноволновые положительные остатки, расположенные в юго-западном секторе модели, относятся к областям с плохим гравитационным охватом и, скорее всего, являются результатом неадекватной геометрии модели. Более длинноволновые положительные остатки, расположенные на южном, западном и северном краях модели, обусловлены краевыми эффектами и могут отражать региональное отклонение от нормы, а также то, что алгоритмы заполнения не полностью учитывают эффекты внешних источников за пределами области модели.

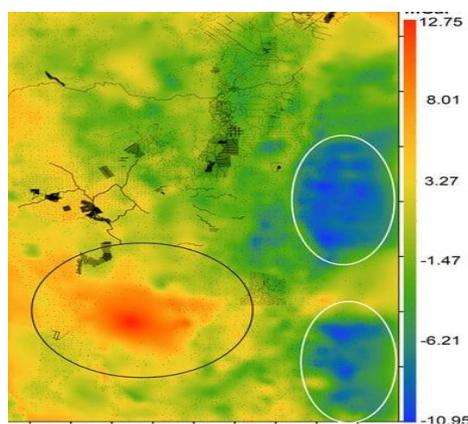


Рис. 14. Несовпадение гравитационных остатков прямой модели (среднеквадратичное несоответствие 2,53 мГал) эталонной модели Розбери–Лайелла.

*Инверсия поля совместного потенциала.*

Для моделирования чувствительности более длинноволновые отрицательные остатки (белые эллипсы) и положительные остатки (черный эллипс). Отрицательные остатки указывают на неадекватную геометрию модели и требуют менее плотного материала, возможно, в виде немагнитного кембрийского гранита.

Использовалось программное обеспечение Geomodeller™. Вычислительные требования байесовского подхода, цепи Маркова и моделирования методом Монте-Карло, использованные для определения чувствительности модели, были значительными, учитывая разрешение вокселей модели от 100 (x, y, z) до 200 м и, следовательно, приблизительно 10 миллионов вокселей модели. Для запуска модели требовался суперкомпьютер на базе Intel Zeon с объемом оперативной памяти более 200 гигабайт и продолжительностью выполнения ~ 2 недели.

Результаты показали проблемные характеристики, особенно в связи с введением ограничений на степень отклонения форм геологических единиц от форм исходной модели. Поскольку геометрические параметры ограничения определяются в терминах доли ячеек модели, сложность и очень большой размер 3D-модели Розбери-Лайелла привели к невозможности найти “золотую середину”, позволяющую предложенной оценке работать надлежащим образом в широком диапазоне размеров единичного объема в модели. Это привело либо к чрезмерным затратам времени на вычисление геофизического отклика геологически неправдоподобных моделей, либо к тому, что в ходе инверсии моделей недостаточно изучено пространство потенциально приемлемых решений. Следовательно, характеристика неопределенности модели Розбери–Лайелла не была выполнена удовлетворительно. Эти проблемы были в значительной степени решены для последующего моделирования путем улучшения программного обеспечения и применения подхода к меньшим по размеру и более удобным моделям.

Несмотря на проблемы с определением характеристик чувствительности, гранитный хребет, лежащий в основе синклинали Хаскиссона, с вкладом соседних серпентинизированных ультрамафитов, был постоянным элементом во всех прогонах моделей, учитывающих гравитационную аномалию притока Крик. Характеристики TCGA были подтверждены дополнительными данными. В ходе бурения на всем протяжении были обнаружены серпентинизированные ультрамафиты, что соответствует окончательной модели Роузбери–Лайелла, Информация, полученная в результате этого бурения, и ее включение в последующее моделирование описаны ниже.

### 5.2. Район Роузбери–Пьемана.

Решая проблемы с определением характеристик чувствительности, связанные с размером и сложностью модели Роузбери–Лайелла, модель Роузбери–Пьемана сосредоточилась на значительно меньшей площади, менее трети площади Роузбери–Лайелла (рис. 1А). При включении большинства элементов 3D–модели Роузбери–Лайелла в синклиналь Хаскиссона были внесены изменения для решения проблем структурной согласованности, очевидных на более ранней стадии моделирования. Это включало в себя включение литологий групп Оуэна и Тиндалла, которые в региональном масштабе несогласованно залегают над аллохтонными мафитно–ультрамафитовыми комплексами. Архитектура разломов эталонной модели и литологические поверхности проиллюстрированы на рисунке 15. При подготовке к прямому и обратному моделированию геометрия геологической единицы была дискретизирована в воксели размером  $250 \times 250 \times 100$  м для геофизического моделирования, в результате получилось  $\sim 1,7$  миллиона ячеек.

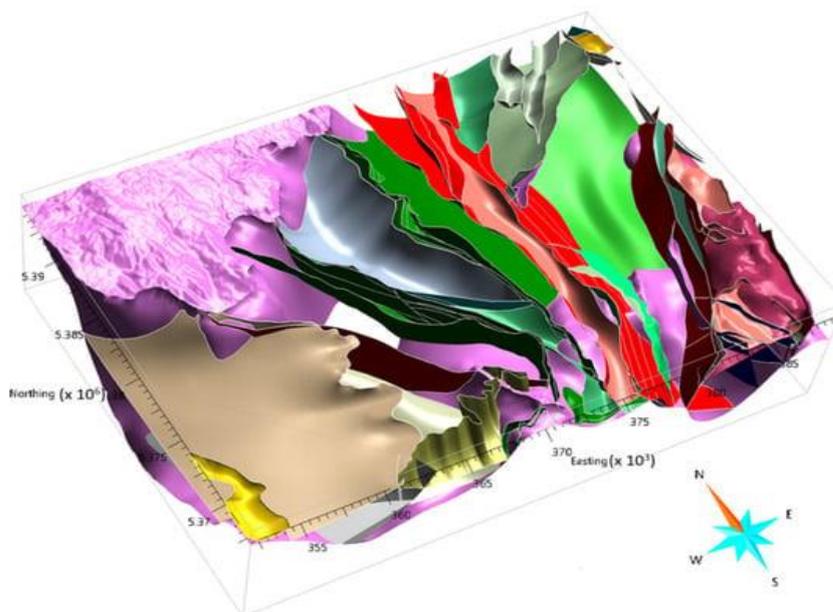


Рис. 15. 3D-схема, эталонной модели Розбери–Пьемана. Розовые поверхности соответствуют девонскому граниту, пурпурные - соответствуют кембрийскому граниту, красные - представляют архитектуру сети разломов.

#### *Эталонное магнитное и гравитационное моделирование.*

Предыдущее гетерогенное моделирование региона Розбери выявило значительные колебания кажущейся намагниченности в пределах матовых и ультрамафитовых объемов. Результаты показывают, по крайней мере, три магнитно различных домена (рис. 13). Разделили ультраосновные объемы на три отдельные единицы (табл. 2) и позволили каждой из них изменяться геометрически. Далее последовало однородное гравитационное и магнитное моделирование свойств. Таким образом, отклик эталонной модели был достаточно

близок к наблюдаемым магнитным и гравитационным данным, чтобы приступить к уточнению с помощью совместной инверсии и определения характеристик стохастической чувствительности.

*Инверсия поля совместного потенциала.*

Для этого исследования было предоставлено около 85 миллионов приемлемых моделей для анализа чувствительности. Из них примерно 32 миллиона включали изменения границ геологических единиц и примерно 67,0 миллионов - изменения физических свойств горных пород. Сосредоточимся на пороге вероятности, статистическом показателе чувствительности модели, который регистрирует литологию, присвоенную вокселю, по крайней мере, в 99% приемлемых моделей, удовлетворяющих наблюдаемым магнитным и гравитационным данным. Дополнительные статистические показатели включают среднюю плотность и среднюю восприимчивость, которые также получены из накопленных принятых предложений/моделей инверсии.

Сначала произошла инверсия силы тяжести (примерно 500 миллионов итераций), и среднеквадратичное несоответствие стабилизировалось на уровне примерно 1,60 мГал (точка выгорания). Этот результат демонстрирует уверенность в пространственной геометрии литологических единиц, используемых в эталонной модели. Длинноволновые положительные и отрицательные остатки присутствуют на западной, северной и восточной границах модели (рис. 16В) и могут отражать региональное отклонение от нормы, а также то, что алгоритмы заполнения не полностью учитывали воздействие внешних источников за пределами области модели. Длинноволновые положительные остатки, расположенные на западном краю модели и лежащие под гранитом Мередит и синклиналию Хаскиссона, могут быть отнесены к неадекватной геометрии модели.

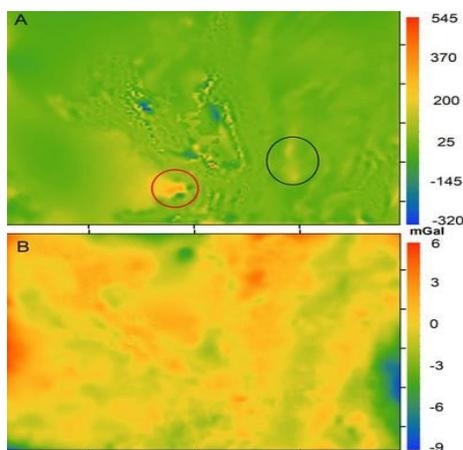


Рис. 16. (А) Остаточное несоответствие ТМГ 3D-модели Розбери-Пьемана после совместной инверсии (среднеквадратичное несоответствие 41,47 нТл). Красный эллипс представляет положительные остатки вблизи месторождения Ренисон Белл, черный - магнитный материал в Центральной вулканической толще. (В) Несоответствие гравитационных остатков. Среднеквадратичное несоответствие составляет 1,56 мГал.

Для сближения магнитной инверсии потребовалось больше времени (примерно 1 миллиард итераций), при этом несоответствие стабилизировалось примерно на 45 нТл. Этот результат объясняется жесткими ограничениями геологических свойств, использованными при моделировании, которые ограничивали количество предложений/одобрений. Рисунок 16А иллюстрирует окончательное остаточное несоответствие. Длинноволновый положительный остаточный сигнал в юго-западном углу модели, который объясняется неадекватной геометрией модели, что предполагает наличие глубокого магнитного элемента в надвиговом контакте с вышележащими протерозойскими рифтовыми образованиями. Коротковолновые положительные и отрицательные остатки в пределах мафитно–ультрамафитовых комплексов, вероятно, имеют геометрическое происхождение или обусловлены инверсией, не полностью учитывающей значения намагниченности выбросов, возможно, из-за остаточности. Напротив, коротковолновые остатки могут быть связаны с минеральными системами и представлять непосредственный поисковый интерес. Например, красный эллипс представляет положительные остатки вблизи месторождения Ренисон Белл, в то время как черный эллипс связан с магнитным материалом в Центральной вулканической толще.

Гравитационная аномалия (рис. 17) представляет собой интерпретирующий поперечный разрез, основанный на наиболее вероятном показателе чувствительности модели, который фиксирует литологию, наиболее часто присваиваемую местоположению вокселя модели из совокупности ~ 85 миллионов приемлемых моделей. Моделирование чувствительности подтвердило глубину до верхней части гранитной поверхности буровой скважины (DDH) TCGA-01 примерно на 1300 м, что примерно на 300 м глубже эталонной модели. Моделирование также подтвердило, что в основе синклинали в этом месте лежат ультрамафитовые литологии. Они интерпретируются как сложенные надвиговые пласты в разломном контакте с литологиями групп Гордона, Оуэна и Тиндалла.

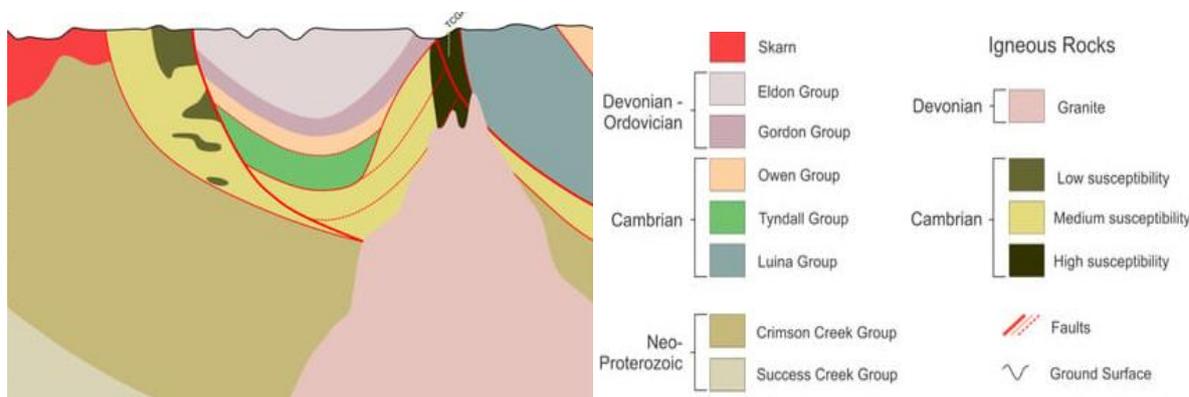


Рис. 17. Интерпретационный поперечный разрез восток–запад через синклинали Хаскиссона на основе показателя чувствительности модели в результате совместной инверсии.

Измерения плотности образцов керна DDH TCGA-01 (ультраосновного состава) варьируются от 2,45 до 2,62 кг / м<sup>3</sup>, в основном в соответствии с оценками модели от 2,53 до 2,60 кг / м<sup>3</sup>, с учетом масштабирования до объемных значений. Плотности образцов вблизи нижнего предела измеренного диапазона предполагают полную серпентинизацию мафит-ультрамафитовых протолитов. Измерения чувствительности образцов керна DDH TCGA-01 в диапазоне от 50 до 180 SI × 10<sup>-3</sup> аналогично согласуются с оценками модели (160-190 SI×10<sup>-3</sup>), особенно после учета вероятного вклада естественного остаточного магнетизма.

Карбонаты становятся несколько более распространенными ближе ко дну DDH TCGA-01, причем магнезит является доминирующим видом, идентифицированным как с помощью NuLogger™ (рис. 18), так и с помощью рентгеноструктурного анализа. Они встречаются в разрушенном керне и на поверхностях стыков/сдвигов. Возможным механизмом образования магнезита может быть конвекция метеоритных вод, вызванная близлежащим магматическим источником. Другая возможность заключается в низкотемпературных гидротермальных флюидах из магматического источника, встречающихся с известняком, что повысило бы концентрацию CO<sub>2</sub> и растворение магнезита. Близлежащий известняк группы Гордон является потенциальным источником CO<sub>2</sub>, и зоны сдвига, наблюдаемые внутри буровой скважины, могут действовать как каналы для жидкости, при этом магнезит осаждается в результате снижения температуры жидкости. Близлежащий девонский гранитоид является вероятным источником магматического флюида.

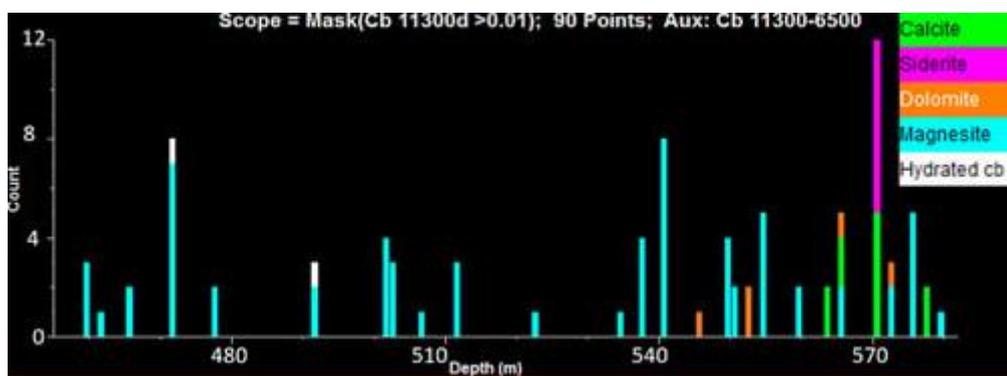


Рис. 18. Данные о содержании карбонатов, полученные при сканировании DDH TCGA-01 с помощью NuLogger™, показывают, что магнезит (aqua) в целом преобладает, а другие породы, включая доломит (оранжевый), кальцит (зеленый) и, особенно, сидерит (пурпурный), становятся все более распространенными, приближаясь ко дну буровой скважины.

### 5.3. Район Роузбери Норт.

Положительная остаточная магнитная аномалия, возникшая на более ранних этапах моделирования, наблюдается к северу и северо-востоку от месторождения Розбери (рис. 16).

Рисунок 19 представляет собой разрез с востока на запад, пересекающий остаточную магнитную аномалию и представляющий показатель пороговой чувствительности вероятности.

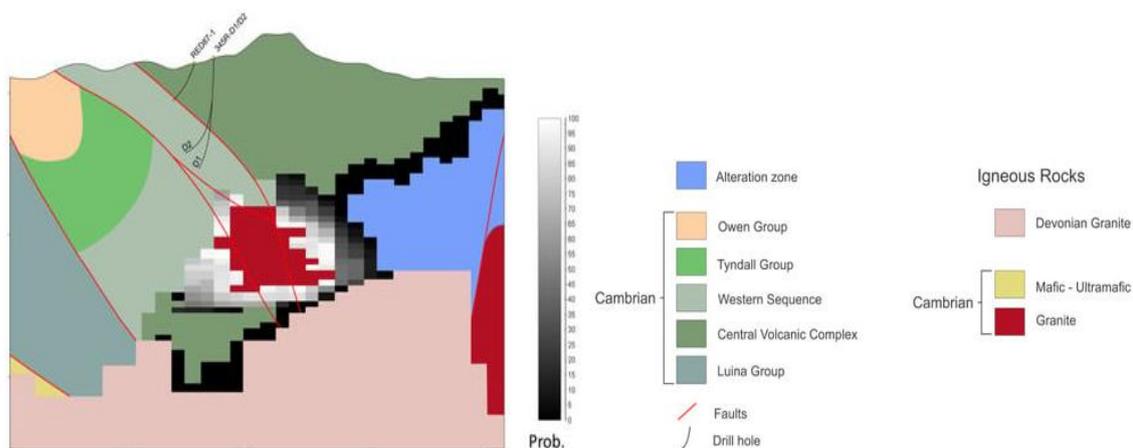


Рис. 19. Поперечный разрез Восток–Запад, иллюстрирующий наиболее вероятную геологию пороговой модели. В оттенках серого показана вероятность наличия кембрийского гранита и зоны изменений

Литология включает предполагаемую толщу осадочных отложений Западного вулкана и SVC. Месторождение полиметаллических руд Rosebery расположено вдоль простирания в этом стратиграфическом положении, в основном к югу. В ответ на остаточную магнитную аномалию инверсия с высокой вероятностью привела к залеганию на глубине 2 км объекта с петрофизическими свойствами, сходными с кембрийским гранитом. Ранее считалось, что кембрийский гранит не существует к западу от зоны разлома Хенти. Ближайшие сохранившиеся скважины к предполагаемой интрузии пересекали сети магнетит–пиритных жил и интрузивные дайки с гранодиоритовым составом, сходным с гранитом кембрия в других частях региона, что согласуется с положением тела, предполагаемым моделированием. Объем немагнитного материала аномально низкой плотности, возникающий в Центральном вулканическом комплексе между двумя погребенными кембрийскими гранитоидными телами, обладает свойствами, соответствующими изменениям кислых вулканитов калиевым полевым шпатом. Материалы с аналогичными физическими свойствами горных пород были отмечены в связи с медной минерализацией типа горы Лайелл в пределах 1-2 км от кембрийского гранита, что предполагает возможность существования такой минеральной системы здесь на разведанных глубинах.

## 6. Северо-Западная Тасмания.

Более обширная из двух представленных здесь моделей охватывала всю Северо-Западную часть Тасмании (рис. 1В).

Комбинированные гравитационные и магнитные характеристики указывают на то, что гранит здесь относительно маломощный ( $\leq 5$  км), с ультрамафитовым комплексом у его основания на глубине  $\sim 3-6$  км, аналогично модели. Эта форма гранита контрастирует с другими плутонами региона, такими как граниты Химскирк и Мередит, гравитационные характеристики которых показывают, что они имеют более глубокие корни, превышающие 10 км, а также соединены на глубине, расширяя область потенциальной минерализации, связанной с гранитом. Гранит, возможно, был срезан подземным надвиговым разломом, хотя это создало бы проблемы для текущего понимания структуры девонских гранитов на северо-западе Тасмании, которые в значительной степени являются посттектоническими.

Полностью скрытая гранитная интрузия была также обнаружена под группой восточного Скалистого мыса на основе низкой остаточной силы тяжести в 8 мГал. Прямых геологических указаний на это вторжение не обнаружено, да и не обязательно их ожидать (его глубина составляет не менее 3 км); таким образом, его возраст не определен, но, возможно, неопротерозойский или девонский. Еще один остаточный уровень отрицательной силы тяжести в южном секторе модели был предварительно интерпретирован как расширение подповерхностного кембрийского гранита в южном направлении; однако его немагнитный характер отличает его от доминирующих кембрийских гранитоидных фаз. Еще одна возможность - изолированная интрузия девонского гранита.

### ***6.1. Район Хизлвуд–Луина–Варата.***

В районе Хизлвуд–Луина–Варата (рис. 1С) расположено несколько важных минеральных систем. Модель  $20 \times 20$  км охватывает протерозойские метаосадочные породы, кембрийские аллохтонные мафит–ультрамафитовые комплексы (включая группу Луина), ордовикско–девонские осадочные породы и девонские гранитные интрузивы. Этот район также включает восточную зону Артурского метаморфического комплекса, который состоит из различных протерозойских протолитов, метаморфизованных в ходе кембрийского горообразования Ть-Теннана.

Как и в случае с более широким моделированием северо-Западной части Тасмании, рабочий процесс потенциальной инверсии поля привел к существенному изменению более ранних концепций геометрии подповерхностных девонских гранитов. На юге батолит Мередит имеет мощность не менее 10 км, в то время как северный край батолита круто обрывается. Было постулировано, что гранитные купола на небольших глубинах (менее 2 км) объясняют очевидные остаточные гравитационные аномалии на северо-востоке.

Новая интерпретация ультрамафитового комплекса, связывающего ультрамафитовые комплексы Хизлвуд и Маунт-Стюарт на юго-западе под осадочными породами, связанными с

синклиналью Белл, подразумевает большой объем ультрамафитового материала в кембрийских последовательностях и указывает на более крупный сформированный компонент, чем считалось ранее. Впоследствии эта интерпретация была подтверждена открытием обнажений ультрамафитов в этом районе. С помощью исследования чувствительности было показано, что ультраосновной комплекс Хизлвуд имеет мощность до  $\sim 4$  км, в то время как ультраосновной комплекс маунт-Стюарт и контактный ореол, окружающий гранит Мередит на севере, меньше (примерно  $< 2$  км. Зона контакта батолита Мередит и мафийно–ультрамафитового комплекса горы Стюарт простирается на максимальную глубину в 2 км. Как недавно обнаруженные гранитные купола, так и ультраосновные комплексы являются потенциальными объектами для Ni типа Эйвбери и других минеральных систем. Неоднородные инверсии свойств показали, что мафитно–ультрамафитовый комплекс Хизлвуд-Ривер характеризуется сильно изменяющейся плотностью и магнитной восприимчивостью. Области с плохим или несуществующим гравитационным охватом означали, что некоторые области в модели имеют низкую достоверность или неразрешены. Эти местоположения включают западную окраину ультраосновного комплекса Хизлвуд-Ривер и к северу от ультраосновного комплекса Маунт-Стюарт.

### **7. 3D-модели Восточного террейна (ЕТТ).**

Были построены три 3D–геологические модели минерализованных районов в ЕТТ, охватывающие районы Лебрина, Альбертон-Матинна и Скамандер (рис. 2). Более простая геология ЕТТ по сравнению с WTT позволила опробовать различные подходы к моделированию.

Олово и орогенное золото являются преобладающими минеральными системами в ЕТТ. Известно, что Sn тесно связан с внедрением девонских гранитов, тогда как происхождение Au (в частности, роль внедрения гранитоидов, если таковые имеются) гораздо менее определено, поскольку структурный контроль осуществляется в различных масштабах. Исторически экономический рост был обусловлен в основном кварцевыми жилами.

#### **7.1. Лебрина.**

Модель Лебрина была построена полностью неявными средствами, посредством чего поверхности, ограничивающие единичные объемы, были интерполированы из геологических наблюдений (стратиграфические контакты, разломы, провалы и простираения) с использованием предварительных геологических знаний, закодированных в матрице правил, определяющих относительное время для всех компонентов модели. Поскольку полезная

модель, таким образом, может быть построена с использованием гораздо меньшего количества вводимых пользователем точек, чем при явном моделировании, это значительно упрощает модификацию модели в ответ на указания последующего геофизического моделирования или возникающую трехмерную геометрическую достоверность.

Верхние несколько километров объема Лебринна протяженностью 49,5 км (с запада на восток) на 59,25 км (с севера на юг) и глубиной ~ 11 км (рис. 2А) в основном состоят из метаосадочных пород вмещающей супергруппы Матинна, прорванных гранитами позднего девона–раннего каменноугольного периода и гранодиоритами, которые выходят на поверхность в восточной части района. Считается, что аллохтонный кембрийский мафитно–ультрамафитовый комплекс лежит в основе большей части территории, в основном на магнитных основаниях, в то время как юго-западная половина покрыта юрским долеритом и пермо-триасовыми отложениями мощностью до нескольких сотен метров (супергруппа Парминера). Исторически значительное количество золота добывалось на нескольких месторождениях супергруппы Матинна и связанных с ними аллювиальных отложениях.

#### *Совместная геофизическая инверсия.*

Была предпринята литоограниченная переменная стохастическая гравитация и магнитная инверсия, описанная в разделе 3.2. Ограничения состояли из нанесенных на карту обнажений поверхности, структурной информации (например, провалов) и информации о неглубоком бурении. Наиболее заметным результатом стало значительное расширение гранитоида под выступающей супергруппой Матинна на востоке и, в меньшей степени, в центре модельного региона (рис. 20).

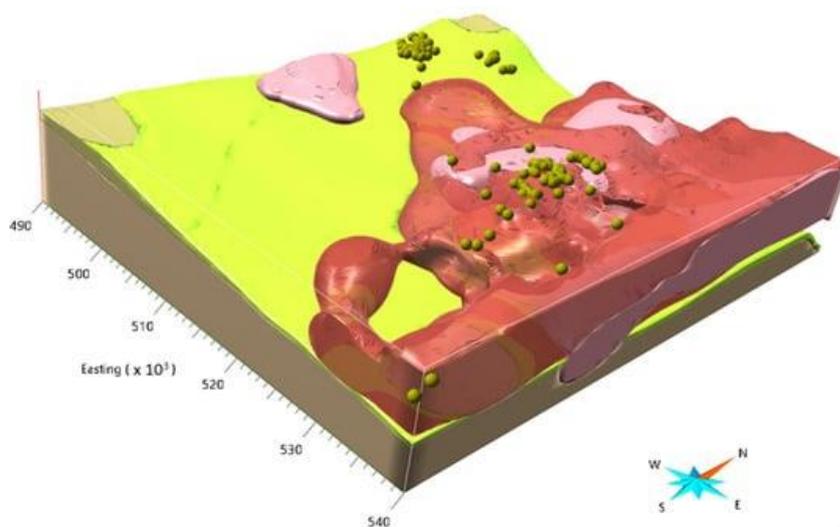


Рис. 20. 3D-модель Lebrina показывает объемы гранита (розовый) и гранодиорита (лососевый), вторгающиеся в ультрамафитовую (светло-зеленую) и подвальную (коричневую) литологии (месторождения золота - золотые сферы вблизи гранитных куполов).

Это открытие, однако, подвержено значительной неопределенности из-за контраста низкой плотности между преимущественно гранодиоритовым составом предполагаемого протяженного батолита и метаосадками супергруппы Матинна. Более того, некоторые элементы с меньшей плотностью и большей «гранитностью» моделируемой интрузии, вероятно, являются ложными там, где они совпадают с топографически возвышенными участками. Позже было обнаружено, что остаточные гравитационные минимумы (рис. 21), приводящие к возникновению предполагаемых подповерхностных гранитных куполов, являются результатом неадекватной коррекции рельефа, примененной к наблюдаемым гравитационным данным.

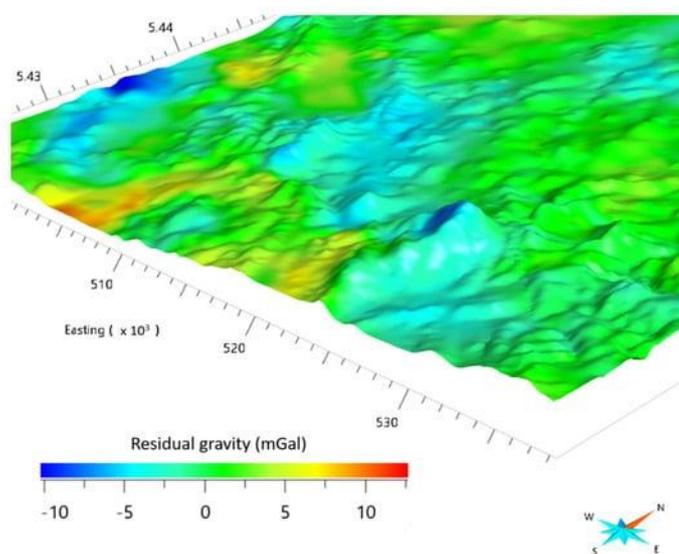


Рис. 21. Гравитационная карта, наложенная на DEM - минимумы гравитации совпадают с топографическими максимумами в результате неадекватной коррекции рельефа

Относительно высокая неопределенность также связана с юго-западным квадрантом модели Лебрина, где обширный магнитный и плотный долеритовый покров маскирует гравитационные и магнитные реакции нижележащих образований; тем не менее, прогнозируется, что под супергруппой Парминер к западу от реки Тамар залегает кембрийская осадочная единица.

#### *Второй этап неявного моделирования.*

Всесторонний пересмотр и уточнение стратиграфии и структуры супергруппы Матинна были включены в модель Лебрина посредством второго этапа неявного моделирования, реализованного в программном обеспечении GoCAD/SKUA™. Эти подразделения супергруппы Матинна не были включены в предыдущую геофизическую инверсию, поскольку они имеют небольшой контраст плотности и намагниченности. Сначала была построена сеть внутренних разломов с использованием структурной информации,

полученной из данных обнажений, выраженной в виде массива поперечных сечений. Затем были добавлены стратиграфические поверхности. Полученные внутренние объемы были затем использованы для замены однородного объема супергруппы Матинна в геофизической модели (рис. 22).

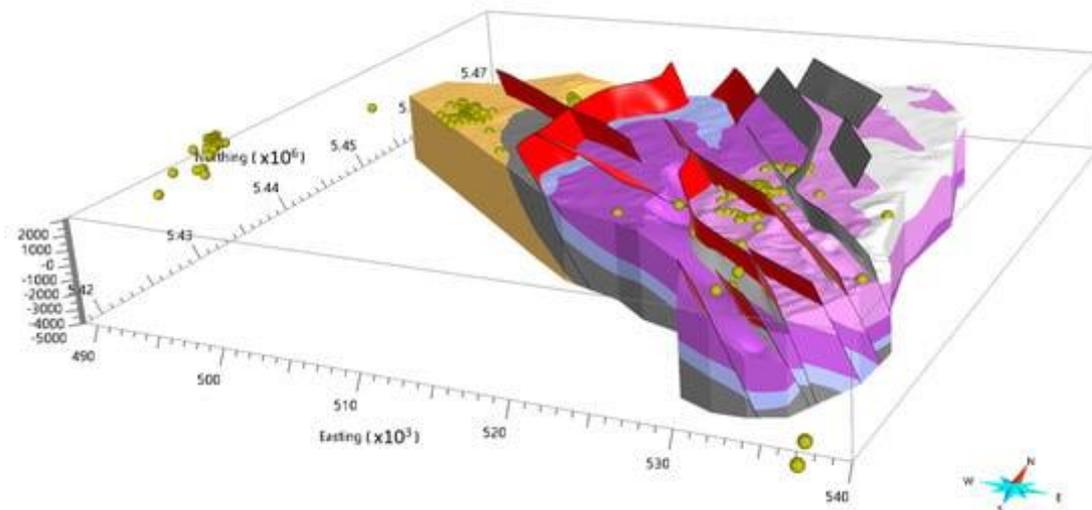


Рис. 22. Разломы (красные и серые поверхности).

Sideling Sandstone (белый), алевролит Lone Star (розовый), Retreat Formation (фиолетовый), алевролит Yarrow Creek (светло-голубой), Turquoise Bluff Slate (темно-серый) и Industry Road member (коричневый).

Не видно никакого влияния сети разломов на форму смоделированных гранитоидных интрузий, что согласуется с тем, что последние в значительной степени являются посттектоническими. Видно, что гранодиорит непрерывно распространяется в недрах, соединяя изолированные выходы на золотых месторождениях Лайл и Панама, и находится в радиусе километра от других залежей золота на золотых месторождениях Денисон и Лебрина. Дальнейшее распространение подповерхностного гранитно-гранодиоритового хребта на северо-запад под кайнозойскими отложениями может указывать на дополнительный потенциал золота в этой области; однако генетическая связь между гранитоидами и золотом в этом регионе, если таковая имеется, остается неясной.

### **7.2. Район Альбертон–Матинна.**

Район Альбертон–Матинна (рис. 2Б) охватывает наиболее экономически значимый тип золоторудного оруденения ЕТТ, встречающийся в основном в кварцевых жилах вдоль тренда, простирающегося на северо–запад-SSE на десятки километров. Региональная геология аналогична геологии Лебрины, с литологией супергруппы Матинна, нарушенной девонскими гранитоидами. Исследование показало более тесную пространственную связь между некоторыми из более крупных известных скоплений золота и подземным гранитом, чем предыдущие интерпретации, и, следовательно, возможность большей роли магматизма в мобилизации минерализующих флюидов. Особенности, проявляющиеся в деталях

смоделированной поверхности гранита, включают купол в окрестностях золоторудного месторождения Матинна (крупнейшего в северо-восточной части Тасмании) и гранит, проникающий в сеть разломов, лежащих в основе месторождения Рингарума Юнайтед на глубине примерно 400 м.

### *7.3. Район Скамандер.*

Район Скамандер (рис. 2С) представляет собой пример зонального месторождения, минералогия которого интерпретируется как функция расстояния от интерпретируемого источника внедрения гранита. W-Mo оруденение встречается рядом с обнажением гранита на северо-востоке, простираясь на юго-восток через Sn (Великая пирамида) и Cu (Ориeko) до Ag-Pb-Zn недалеко от побережья. Предполагается, что зональность отражает пологое расширение гранита под месторождениями, что в целом подтверждается гравитационным моделированием. Основная порода, в которую вторгается гранит, представляет собой супергруппу верхняя Матинна, включающую силуро-девонский период, алевролит Лоун Стар и девонскую формацию Скамандер.

#### *Построение модели.*

Эталонная модель была построена с использованием метода явного моделирования, описанного в разделе 3.1., с использованием последовательных поперечных сечений района, приведенных ниже. Модель была дискретизирована в ячейки размером 250×250×100 м для прямого и обратного моделирования с использованием модуля GOCAD® "Потенциальное поле" (код VPmg). Оценки свойств объектов были получены из петрофизической базы данных MRT.

#### *Геофизическое моделирование.*

Был использован подход, повторяющий магнитно-гравитационный переход, однородность (единственное значение свойства для всей единицы) и инверсию геометрии. Для инверсии геометрии девонскому граниту было разрешено варьировать, чтобы учесть остатки плотности на длинных и коротких волнах. Изменения исходной поверхности гранита включали ярко выраженные купола вблизи крупных разломов и отложений (рис. 23). Была проведена дальнейшая однородная инверсия с использованием этой новой геометрии гранита, чтобы еще больше ограничить отдельные значения свойств для каждой литологии. Результаты показывают разумное соответствие общим крупномасштабным наблюдаемым гравитационным характеристикам, включая значения физических свойств породы в единицах измерения (табл. 3).

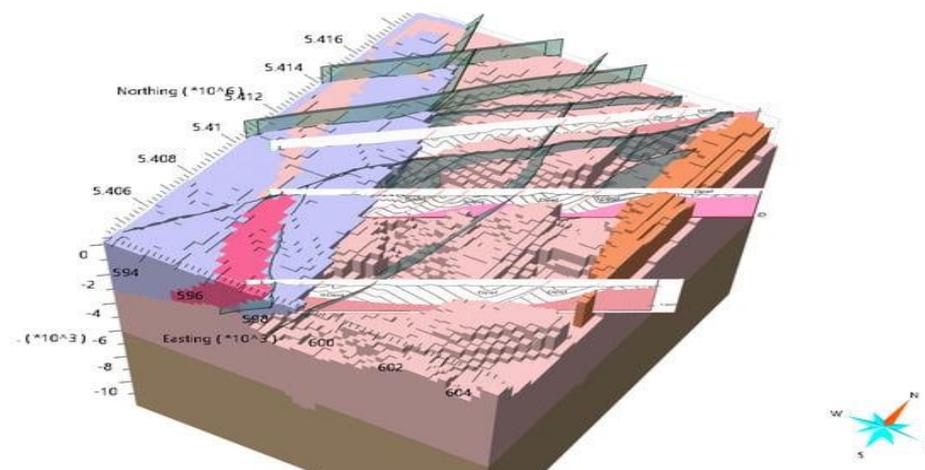


Рис. 23. Дискретизированная эталонная 3D-модель Scamander. Поперечные сечения - поверхность гранита (розовый) и сеть разломов (прозрачный бирюзово-серый).

Магнитное моделирование было затруднено из-за того, что все модельные элементы в основном немагнитные. Наблюдаемые магнитные аномалии связаны с дайками кварцевого долерита, проникающими вдоль разломов северо-восточного направления. Последние приписываются скоплениям (моноклинного) пирротина, которые, как известно, связаны с несколькими проявлениями минералов. Ориентировочная геометрия этих источников была определена путем учета неоднородных изменений восприимчивости алевролитов Лоун Стар и формации Скамандер в сторону увеличения (табл. 4), результаты представлены ниже.

#### *Совместная геофизическая инверсия.*

Для анализа чувствительности было сгенерировано около 117 миллионов приемлемых моделей. Из них примерно 6 миллионов включали изменения границ геологических единиц и примерно 111 миллионов - изменения физических свойств горных пород. Статистические показатели, используемые для этого исследования, включают порог вероятности, который регистрирует литологию, присвоенную вокселю, по крайней мере, в 99% приемлемых моделей, которые удовлетворяют наблюдаемым магнитным и гравитационным наблюдениям. Дополнительные статистические показатели включают среднюю плотность и среднюю восприимчивость, которые также получены из накопленных принятых предложений/моделей инверсии.

Сначала произошла конверсия гравитационной инверсии (примерно 25 миллионов итераций), при этом среднеквадратичное несоответствие стабилизировалось на уровне примерно 0,3 мГал, что близко к оценке шума наблюдаемых данных с учетом разрешения модели. Многочисленные положительные и отрицательные характеристики остаточного гравитационного несоответствия в малом масштабе на коротких волнах (рис. 24А) указывают на отклонения от среднеквадратичных свойств, которые могут возникнуть в результате

изменений или других процессов, связанных с минеральными системами, и, таким образом, представляют собой цели для последующих поисков. Краевые эффекты на восточной границе модели могут отражать изменение региональных тенденций и то, что алгоритмы заполнения не полностью учитывают источники, расположенные непосредственно за пределами области модели. Положительный остаток был связан с дайкой Катос-Крик, что позволяет предположить, что этот гранодиорит может быть более плотным и, следовательно, возможно, более основным по составу, чем предполагалось.

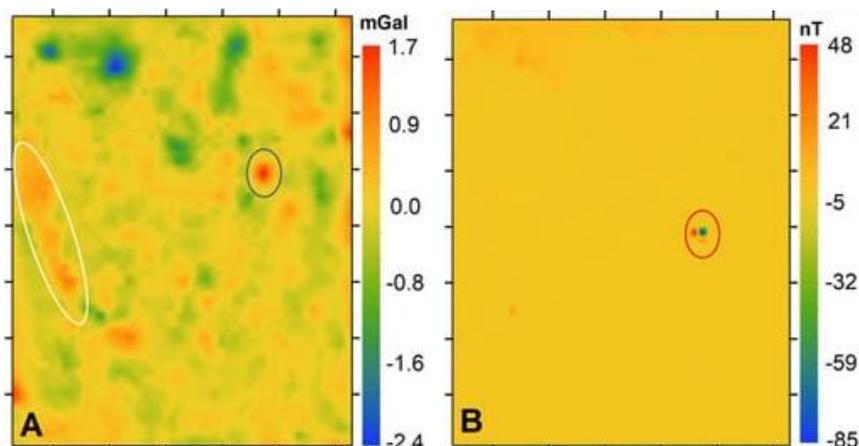


Рис. 24. (А) Несоответствие гравитационных остатков после совместной инверсии для 3D-модели Scamander. (В) Черно-белые эллипсы подчеркивают положительные остатки, связанные с месторождением Ориеко коппер

Среднеквадратичное несоответствие стабилизировалось на уровне около 0,3 мГал, что очень мало. Остаточное несоответствие ТМІ при среднеквадратичном несоответствии стабилизируется на уровне около 3 нТл. Красный эллипс представляет выбросы, связанные с перспективой Северного Скамандра Cu, Pb-Zn-Ag. Месторождение обладает сильными магнитными свойствами и состоит из жильных сульфидных минералов с массивными магнетитом и пирротинном.

Магнитной инверсии потребовалось больше времени для сближения, чем гравитационной (примерно 50 миллионов итераций), при этом несоответствие стабилизировалось примерно на 3 нТл. Рисунок 24В иллюстрирует остаточное несоответствие, которое было незначительным, за исключением нескольких вокселей с более значительными положительными остатками, которые модель не смогла учесть. Они могут представлять собой дополнительные объемы аномально магнитного (возможно, пирротинового) материала в супергруппе Матинна сверх более магнитной подгруппы, допускаемой априори определенным бимодальным распределением магнитной восприимчивости для этих единиц. Наиболее ярким примером этого на рисунке 24В (~2 км к востоку от центра) является месторождение Северный Скамандер Pb-Cu-Ag-Zn, где

массивный магнетит (до 40% по объему) был вскрыт в результате бурения на глубине DDH ~200 м. Вокселы с более умеренной магнитной инверсией, показанные на 599900E и 602000E на поперечном разрезе 5413500N восток–запад (рис. 25B), соответствуют, соответственно, рассеянному и жильному магнетиту, пробуренному на глубине в месторождении Great Pyramid Sn (SPG 1A, с сильно изменяющейся восприимчивостью магнитной аномалии, простирающейся более 5 км к северо-западу, где в результате бурения был выявлен рассеянный пирротин.

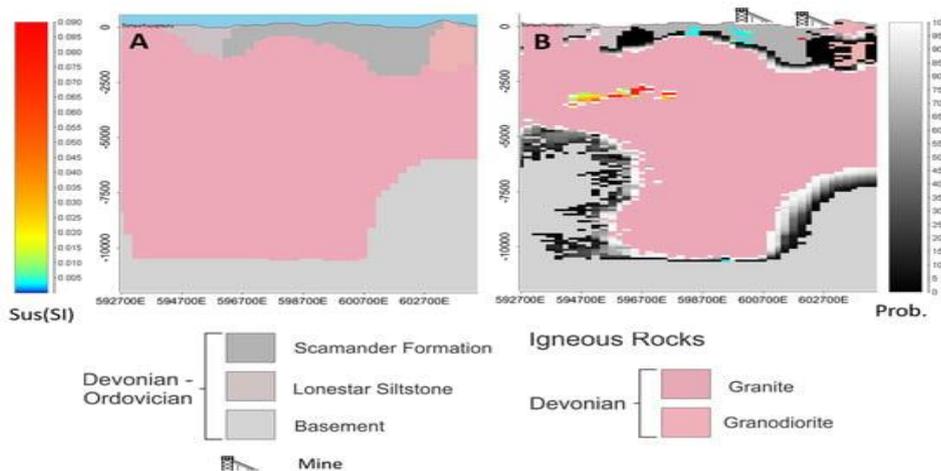


Рис. 25. (А) Поперечный разрез Восток-Запад, иллюстрирующий геологию модели м-ния Great Pyramid Sn. (В) иллюстрирует наиболее вероятную пороговую геологическую модель и включает вероятность наличия девонского гранита и среднюю восприимчивость, полученную на основе моделирования чувствительности.

#### *Инверсионный анализ — Олово Великой пирамиды и другие месторождения.*

По сравнению с эталонной моделью инверсия (рис. 25Б) с высокой вероятностью показала менее объемный гранит. Глубина до вершины выступающего купола остается примерно 400 м (ниже глубины самого глубокого бурения на сегодняшний день в Великой пирамиде - 348 м), что наводит на мысль о том, что это источник минерализующих гидротермальных флюидов, ответственных за месторождение Великой пирамиды (м-ния меди Северный Скамандер и Ориеко) также расположены вблизи близлежащих гранитных куполов, что подтверждает роль гранита в их происхождении. В целом, результат инверсии подтверждает гипотезу о флюидах, полученных из гранита, как наиболее вероятном источнике металлов, при этом температура флюида и расстояние от гранита определяют минералогию отложений на месторождении полезных ископаемых Скамандер.

Появление гранитных корней, простирающихся на несколько километров вниз, является более сомнительным результатом инверсии, возможно, указывая на чрезмерную подгонку гравитационных данных или недостаточный контраст плотности с нижележащим материалом фундамента. На границе между литологиями девонского гранита и Матинны существует высокая степень неопределенности. Высокий уровень неопределенности также связан с

геометрией дайки Скамандерского яруса, которую инверсия делает менее объемной, чем в эталонной модели. Это объясняется низким контрастом плотности между метатурбидитами супергруппы Матинна и гранодиоритовой дайкой.

## **8. Выводы.**

1. Создание 3D-модели в масштабе Тасмания способствовало эффективности поисковых работ. Был четко идентифицирован ряд объектов, наиболее заметным из которых является объект VHMS, расположенный под кайнозойским базальтовым покровом к северу от месторождения Хеллиер. 3D-модель также легла в основу комплексной геопространственной оценки минерального потенциала штата по 45 моделям минеральных систем.

2. В 2011 году MRT приступила к разработке региональных 3D-моделей Западного и Восточного террейнов Тасмании следующего поколения с высоким разрешением. Эти модели включали более высокие уровни стратиграфической и структурной детализации и были ограничены полным трехмерным магнитным и гравитационным моделированием. Первой из них была 3D-модель региона Роузбери, охватывающая самую важную минеральную провинцию Тасмании. Это моделирование выявило значительный остаточный уровень отрицательной силы тяжести (TCGA) вблизи предполагаемой юго-западной синклинали Хаскиссона. Это стимулировало дальнейшие гравиметрические исследования и бурение, включая серию исследовательских проектов (3D-модели Северо-Западной Тасмании и Хизлвуда–Луины–Вараты).

3. Производные модели региона Роузбери (т.е. 3D-модели Роузбери–Лайелла и Роузбери–Пьемана) были построены с использованием статистических характеристик чувствительности для достоверного отображения геометрии геологических единиц на глубине. Результаты подтвердили глубину до верхней части гранитной поверхности под TCGA примерно в 1300 м. Дополнительная находка, размещенная с высокой вероятностью, представляет собой магнитное тело с петрофизическими свойствами, сходными с кембрийским гранитом, на глубине примерно 2 км под горой Блэк. Это подразумевает потенциал минеральной системы типа горы Лайелл.

4. 3D-модели Восточного террейна (Лебрина, Матинна-Альбертон и Скамандер) позволили получить новое представление, в частности, о геометрии подповерхностных слоев гранитоидов, которые широко распространены в регионе. Хотя модели сами по себе не могут быть окончательными, были обнаружены пространственные взаимосвязи между интрузиями и известной орогенной минерализацией золота и цветных металлов. Модель Лебрина впервые была построена полностью неявными средствами. Наиболее заметным результатом стало

обнаружение значительного объема гранитоидов под супергруппой Матинна на востоке. Однако позже было обнаружено, что остаточные гравитационные минимумы, приводящие к возникновению предполагаемых подповерхностных гранитных куполов, являются результатом неадекватной коррекции рельефа, примененной к наблюдаемым гравитационным данным. Всесторонний пересмотр и уточнение стратиграфии и структуры супергруппы Матинна были включены в модель Лебрина посредством второго этапа неявного моделирования для визуализации в 3D стратиграфии супергруппы Матинна.

5. В случае модели Скамандера результаты анализа чувствительности позволили получить значительно более подробную модель гранита по сравнению с предыдущими моделями. Среди новых объектов - купола в окрестностях Великой пирамиды, Ориеко, Лутвиче и перспективы Северного Скамандера. Этот результат подтверждает гранитное происхождение оруденения в м-нии Скамандер и указывает на вероятную роль проницаемых структур во вмещающих породах супергруппы Матинна для локализации минерализующих флюидов, а также контроля проникновения гранита.

6. Получение прогнозной информации из 3D-моделирования может быть затруднено из-за того, что модели слишком большие или слишком подробные, чтобы их можно было легко исследовать, особенно когда методы моделирования не позволяют легко вносить значительные геометрические изменения. Наиболее эффективным рабочим процессом 3D-моделирования для получения информации является тот, который облегчает быструю проверку гипотез в широком диапазоне сценариев, удовлетворяя при этом ограничениям наблюдаемых данных. Платформы будущего моделирования — например, проект LOOP, в случае успеха, позволят быстро проверять гипотезы в форме совместимого, интегрированного и вероятностного 3D-геолого-геофизического моделирования.

7. Минеральные системы функционируют во времени и в трех измерениях. Показатели обнаружения будут повышены за счет улучшения моделирования геометрии геологических систем контроля минерализующих флюидов. Необходимо продолжать разрабатывать региональные 3D-модели высокого разрешения, которые могут использоваться геологоразведочными компаниями для принятия более обоснованных решений при поисках.

#### IV. ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ РУДНОГО РАЙОНА НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО ГЕОЛОГО–ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*(рудный район Ашеле, Синьцзянь, Китай) [3].*

##### **1. Введение.**

В прошлом геолого–геофизическое моделирование в масштабе рудных районов в основном применялось в районах с относительно богатыми геологическими данными, и 3D-модели строились на основе параллельных (или приблизительно параллельных) профилей. Этот метод больше подходит для рудных районов с относительно богатыми геологическими данными и хорошей стратиграфической непрерывностью. Трудно отразить фактическую геологическую ситуацию в рудных районах с разреженными данными и сложными геологическими структурами, особенно фактическую геологическую ситуацию в глубинных структурах, перпендикулярных профилям, в районах с разреженными данными. Следовательно, необходимо улучшить или разработать новые методы моделирования.

В этом исследовании предлагается метод геолого–геофизического моделирования на основе нерегулярных разрезов путем обобщения и улучшения предыдущих методов моделирования рудных районов. Этот метод используется для построения трехмерной геолого-геофизической модели рудного района Ашеле в Синьцзяне, Китай. Благодаря визуализации и анализу 3D-модели это исследование предсказывает новые перспективные площади для поисков на основе геологической информации и улучшает метод моделирования.

Моделирование на основе нерегулярных разрезов было выполнено в пределах площади поверхности 306 км<sup>2</sup> и глубины 5000 м. Практика доказала, что этот метод моделирования может эффективно и надежно создавать модели сложной геологической структуры за счет полного использования различных типов существующих данных посредством интеграции данных из нескольких источников, и он может ограничивать геологические модели за счет использования 2D и 3D инверсии геофизических данных для более точного моделирования пространственных геологических структур и тел и отражения прогнозно-поисковых проблем. Метод особенно подходит для районов с относительно скудными геологическими данными и сложными геологическими условиями.

Рудный район Ашеле находится в северо-западном Алтайском орогенном поясе, примерно в 20 км к северу от уезда Хабахэ, Синьцзян, Китай. В этом районе было обнаружено несколько полиметаллических месторождений, включая медно–цинковое месторождение Ашеле, золото–медное полиметаллическое месторождение Саершуоке, медное месторождение Кайиндэ и медное месторождение Хуашугоу. Это важный район

концентрации руды вулканогенно-сульфидного типа (VMS) в Китае. В последние годы, по мере продвижения исследований, считается, что ресурсный потенциал района Ашеле далеко не исчерпан и открытие новых месторождений, преимущественно скрытых, в основном зависит от понимания глубинных геологических структур, включая пространственные формы и масштабы геологических тел, а также пространственного распределения плутонов и рудоконтролирующих зон. 3D-моделирование является эффективным средством достижения этой цели.

## 2. Геологические условия.

Большая часть юго-западного района Ашеле покрыта четвертичным покровом. Скважинные и геологические данные в основном сосредоточены на месторождениях и близлежащих рудопроявлениях.

Район геотектонически расположен на стыке тектонической области островодужной дуги Ашеле (вторичная тектоническая единица системы дуга-бассейн позднего палеозоя в Южно-Алтайском орогенном поясе Сибирской плиты) и бассейна преддуги позднего палеозоя Хабахе (рис. 1).

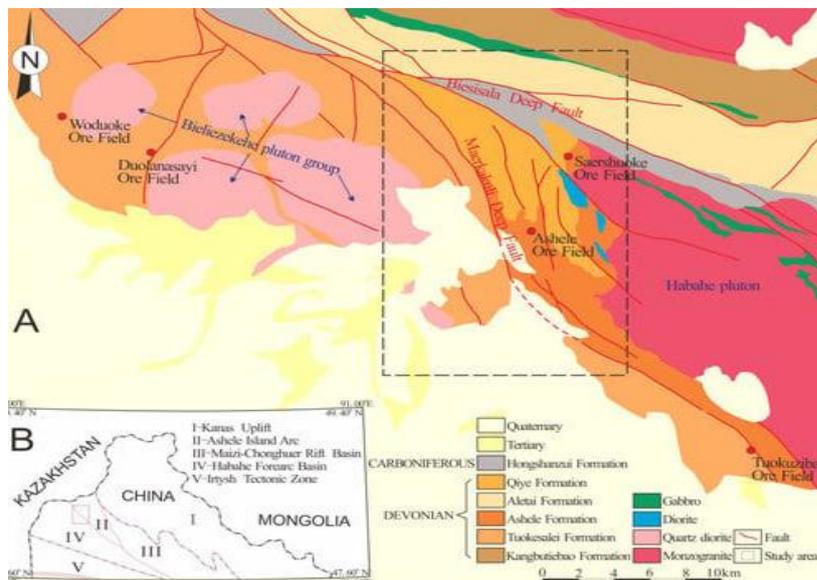


Рис. 1. (А) Упрощенная геологическая карта района Ашеле;  
(В) тектоническая схема СЗ Китая (красная рамка - местоположение исследуемого района).

В исследуемом районе сильна магматическая активность, развиты вулканические и субвулканические породы, интрузивные комплексы. Вулканические породы, которые формировались с раннего девона по ранний каменноугольный период, распределены в структуре островной дуги Ашеле. Интрузивные породы в основном представляют собой герцинские кислые и локально распространенными основные комплексы. Стратиграфические

подразделения в основном включают четвертичную, третичную и каменноугольную формацию Хуншаньцзуй; верхнедевонскую формацию Кие; среднедевонскую формацию Ашеле; среднедевонскую алтайскую формацию; ниже-среднедевонскую формацию Туокесалей; и нижедевонскую формацию Канбутибао. В их составе преобладают осадочные породы, вулканические лавы и туфы различной литологией, а также сланцы, кварцево-полевошпатовые песчаники, алевролиты и карбонатные породы.

В районе развиты складчатость и системы разломов. Структуры складок, как правило, направлены на северо-запад, демонстрируя сильную расщепленность. Разломы также, как правило, имеют северо-западное направление, основные разломы - Маеркаули и Биесисала.

Типичными месторождениями в исследуемом районе являются медно-цинковое месторождение Ашеле и золото-медно-полиметаллическое месторождение Саершуоке. М-ние Ашеле тектонически расположено в юго-западной части Алтайского орогенного пояса, к востоку от разлома Маеркаули. Его разведанные рудные тела в основном расположены в инвертированной синклинали, а формация Ашеле является основным рудоносным горизонтом месторождения. Золото-медно-полиметаллическое месторождение Саершуоке расположено примерно в 5,6 км к северо-востоку от м-ния Ашеле. Его рудные тела в основном залегают в риолитовом порфире. Золото-медные рудные тела в основном залегают в виде жил и сети прожилков, а глубокие свинцово-цинковые рудные тела в основном стратиформны. Руды в основном массивные, густо и редко рассеянные.

### **3. Метод трехмерного моделирования.**

Основная идея этого метода заключается в установлении разреженного профиля магистрали, используя геологические и геофизические данные для управления общей структурой исследуемой территории, а затем в построении 3D геологической модели на основе профиля магистрали путем интерполяции. Затем геологическая модель преобразуется в модель физических свойств для 3D гравитационной и магнитной инверсии, и модель модифицируется путем постепенного добавления вспомогательного участка в любом месте, пока результаты инверсии не станут удовлетворительными. Каждый вспомогательный участок может представлять собой разрез или профиль с любым наклоном, простиранием и размером. На рисунке 2 показан общий процесс метода. Он в основном включает шесть этапов: сортировку данных, обработку и интерпретацию информации, построение ключевого геологического профиля, построение геологической модели 3D, инверсию с ограничениями 3D и визуализацию модели.

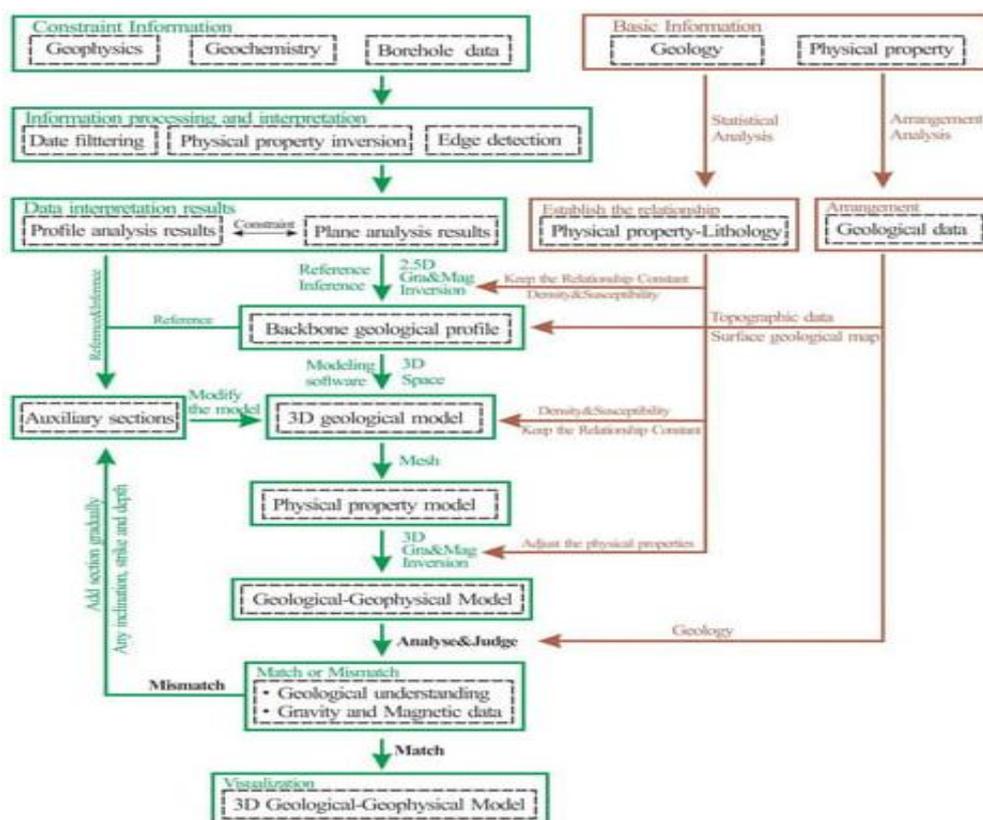


Рис. 2. Схема методологии для генерации 3D-модели.

*Сортировка данных:* Соответствующие данные в основном включают геологические данные, данные о скважинах, физических свойствах, геофизические и геохимические данные. Собранная информация разделена на две категории в соответствии с требованиями: ограничительная информация и базовая информация. Информация об ограничениях относится к информации, которая может косвенно ограничивать форму модели, в основном включая геофизические данные, геохимические данные, данные скважины и т.д. Базовая информация относится к необходимой информации, которая всегда участвует в процессе инверсионного моделирования. Она в основном включает геологические и физические свойства.

*Обработка и интерпретация информации:* это в основном относится к дополнению и извлечению эффективной информации из ограниченной информации. Для геофизических данных (гравитационных, магнитных и электрических) выполняется многомасштабное обнаружение границ и инверсия сетки для извлечения эффективной информации о геологических единицах (таких как разломы, плутоны и пласты) на основе обычной сетки, фильтрации и разделения потенциальных полей.

*Построение геологического профиля магистрали:* расположение профилей запланировано с целью контроля общей тектонической структуры исследуемой территории.

Интерпретация информации об ограничениях используется для вывода и построения профиля, отражающего пространственное распределение пластов, разломов, плутонов и рудных тел в районе, через который проходит профиль. После завершения предварительного построения профиля форма профиля векторизуется и импортируется в программное обеспечение. Отработанная технология гравитационного и магнитно-инверсионного моделирования 2D используется для корректировки профиля с целью определения окончательной формы геологического профиля магистрали.

*Построение 3D-геологической модели:* перевернутый и скорректированный геологический профиль магистрали, измеренная и интерпретированная, структурная информация и геологическая карта поверхности импортируются в 3D-пространство после определения области моделирования и добавления топографических данных. Затем для построения 3D-геологической модели используются технологии визуализации и интерполяции. В настоящее время модель в основном отображает общую геологическую структурную структуру исследуемого района, и детали модели плохо согласуются с фактическими геологическими условиями. На более позднем этапе выполняются множественные инверсии с ограничениями для постоянной корректировки и улучшения геологической модели.

*Трехмерная ограниченная инверсия:* используя гравитационные и магнитные данные после разделения потенциального поля в качестве базовых данных инверсии, 3D геологическая модель преобразуется в модель физических свойств в соответствии с анализом физических свойств. Затем модель физических свойств подвергается принудительной инверсии. Границы геологических тел - это известные условия, которые нелегко изменить. Во время инверсии сначала корректируются физические свойства геологических единиц, а затем один за другим добавляются вспомогательные участки для изменения границ геологических тел в соответствии с измеренными данными. В конечном итоге 3D-модель соответствует не только геологическому пониманию, но также гравитационным и магнитным данным.

*Визуализация модели:* Построенная модель импортируется в платформу визуализации, такую как Encom RA или Voxel. Пространственные структуры геологических тел анализируются в глубину, чтобы извлечь геологическую информацию для прогнозирования глубокой минерализации или для анализа пространственной взаимосвязи между геологическими телами, связанными с минерализацией, для создания металлогенических моделей. Модель также может быть использована для проектирования рудника, расчета запасов и прогнозирования глубинных и периферийных рудных тел.

#### 4. Интерпретация данных.

##### 4.1. Анализ данных о физических свойствах.

Анализ данных о физических свойствах показывает, что слои в районе, как правило, менее плотные, чем интрузивные породы (табл. 1), что связано с основными литологиями (т.е. нормальными осадочными породами и вулканическими породами средней кислотности) каждого пласта и разрушительной тектонической активностью и частой магматической гидротермальной активностью в разные периоды.

Табл. 1.

Статистическая таблица образцов физических свойств пород района.

Geological Unit	Code	Lithology	Density (g/cm <sup>3</sup> )		Susceptibility (×10 <sup>-3</sup> SI)	
			Average	Range	Average	Range
Quaternary	Q	—	1.60	1.21–1.92	0.000	—
Tertiary	Wulunguhe	E <sub>2-3ω</sub>	1.80	1.50–2.00	0.000	—
Carboniferous	Hongshanzui	C <sub>1h</sub>	2.61	2.43–2.72	1.800	0.000–23.059
	Qiye	D <sub>3q</sub>	2.60	2.45–2.71	5.007	0.025–37.473
	Ashele	D <sub>2as</sub>	2.57	2.34–2.78	3.106	0.000–94.399
Devonian	Altay	D <sub>2al</sub> <sup>2</sup>	2.64	2.53–2.72	2.722	0.000–23.059
		D <sub>2al</sub> <sup>1</sup>	2.75	2.71–2.78		
	Tuokesalei	D <sub>1-2t</sub>	2.63	2.06–3.22	1.691	0.000–23.059
	Kangbutiebao	D <sub>1k</sub>	2.61	2.41–2.69	0.078	0.000–3.267
The basement strata	base	—	2.67	2.34–3.13	1.665	0.100–7.062
Basaltic andesite	βα	Basaltic andesite.	2.71	2.64–3.03	0.327	0.038–0.917
Skarn	sk	Skarn.	3.38	2.17–3.80	40.700	1.169–301.857
Gabbro	v	Gabbro (surface).	2.80	2.72–2.87	1.232	0.500–13.358
		Gabbro (drill hole).			149.630	41.670–344.067
Diabase	βμ	Diabase.	2.84	2.66–2.98	51.100	11.000–53.001
Diorite	δ	Diorite.	2.86	2.80–2.92	3.066	0.000–84.873
Dioritic porphyrite	δμ	Dioritic porphyrite.	2.80	2.72–2.90	0.968	0.088–5.366
Quartz diorite	δσ	Quartz diorite (surface-east side of the area).	2.82	2.60–3.22	0.352	0.063–0.993
		Quartz diorite (surface-west side of the area).	2.72	2.53–2.85		
		Quartz diorite (drill hole).			37.615	0.000–71.176
Monzogranite	ηγ	Monzogranite.	2.67	2.54–2.81	0.000	—
Granite	γ	Granite.	2.56	2.48–2.66	1.869	0.000–18.887

Кварцевый диорит (на одной стороне плутона Хабахе), скарн, диорит, габбро и диоритпорфирит имеют самую высокую плотность среди пород в исследуемом районе с узкими литологическими диапазонами распределения, в основном в виде жил и скоплений, которые часто вызывают значительные гравитационные аномалии с большими амплитудами и крутыми градиентами в этом районе. Кварцевый диорит (к юго-западу от разлома

Маеркакули) и базальтовый андезит имеют высокую плотность. Монцогранит имеет среднюю плотность. Основные породы (габбро и т.д.) в этом районе, очевидно, имеют плотность, отличную от плотности окружающих пород, а аномалии высокой гравитации или аномалии слабой гравитации на периферии аномалий высокой гравитации представляют собой в основном погребенный или полупогруженный основной массив горных пород.

Магнитный анализ показывает, что морские вулканические породы среднего кислого состава в формации Ашеле обладают слабым магнетизмом, в то время как верхнедевонская формация Кие обладает относительно сильным магнетизмом и неравномерными магнитными изменениями. Пирокластические породы среднего мафита и вулканическая лава на восточной стороне разлома Маеркакули обладают сильным магнетизмом, в то время как другие районы относительно слабы. Эти характеристики магнетизма отражают относительное обогащение магнитными минералами в восточном регионе из-за влияния плутона плагиоклазового гранита Хабахе. Нормальные осадочные породы, пирокластические породы средней кислотно-основного состава и вулканическая лава, как правило, немагнитны, и небольшая их часть неоднородна и слабо магнитна. Некоторые брекчии и брекчиевая лава умеренно магнитны. Субвулканические породы среднего мафа, как правило, слабо магнитны, а некоторые плутоны умеренно магнитны. Скарны и некоторые кварцевые диориты умеренно магнитны, в то время как габбро сильно магнитны и могут вызывать очевидные магнитные аномалии.

Примечательно, что петрофизические свойства меняются с глубиной. При 3D-инверсии потенциальных полевых данных крайне важно всесторонне изучить и проанализировать законы изменения основных петрофизических свойств с глубиной залегания, которые в основном зависят от анализа физических свойств образцов из скважин. Хотя такая информация ограничена в этой исследуемой области, доступные данные по-прежнему обеспечивают важную базовую информационную поддержку для моделирования. Кроме того, под влиянием различных геологических условий и тектонической активности физические свойства одной и той же литологии различаются в разных регионах. Например, кварцевый диорит вблизи плутона Хабахе и кварцевый диорит на юго-западе района имеют определенные различия в плотности и магнитной восприимчивости, поэтому их следует различать при инверсии и моделировании.

#### ***4.2. Интерпретация геофизической информации.***

Были собраны и отсортированы предыдущие геологические, скважинные, геофизические и геохимические данные поисковых и др. работ в районе; проведена гравитационная, магнитная и магнитотеллурическая профильные съемки в районе; привязка потенциальных

полей, улучшение информации и другая обработка; а также анализ физических свойств, геологических данных и скважинной информации.

#### 4.2.1. Гравитационные и магнитные данные.

Была использована геодезическая сетка с расстоянием между линиями 500 м и между точками 100 м, с гравиметрическим прибором CG-5 и двухчастотным дифференциальным прибором GPS-позиционирования Trimble R8 для получения гравитационных данных Буге с точностью до 500 м. Магнитные данные были получены с шагом сетки 250×50 м и были привязаны к сетке 100×100 м, использован фильтр приведения к полюсу (RTP) с магнитным наклоном 69,1°, склонением 4,5° и магнитной аномалией RTP (рис. 3).

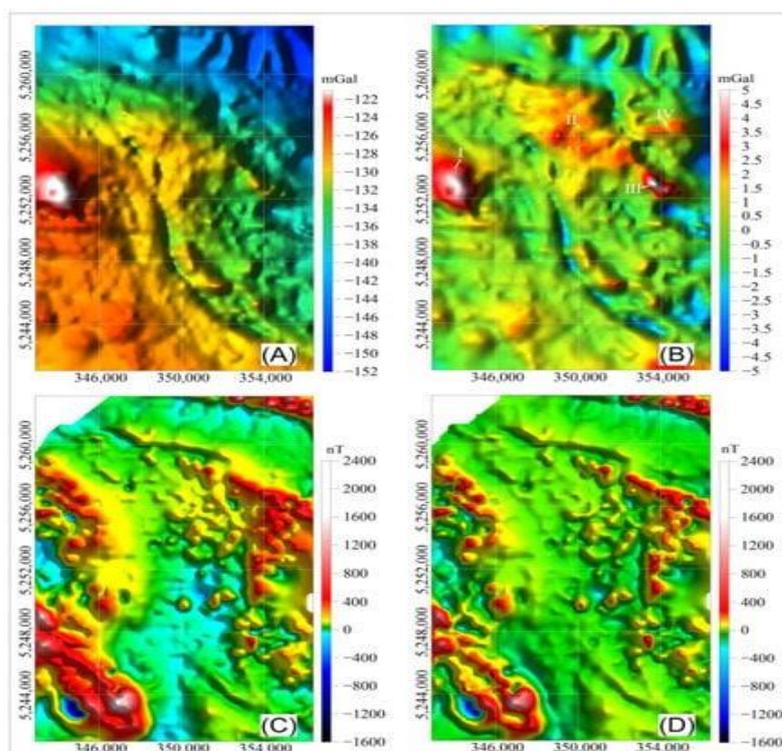


Рис. 3. Карты гравитационных и магнитных аномалий.

(A) гравитационные аномалии Буге (B) остаточные гравитационные аномалии-скользящее окно 16,5×16,5км; (C) поляризованная магнитная карта (D) остаточные магнитные аномалии-скользящего окна 4,5×4,5 км.

Использовались различные методы разделения потенциальных полей для обработки гравитационных и магнитных данных, а затем отбирались соответствующие результаты разделения для базового статистического анализа посредством сравнений. Сравнения в основном включают два аспекта. Одним из них является сравнение результатов обработки различными методами (если два или более методов дают сходные результаты обработки, применяемые методы обработки считаются приемлемыми); другим является сравнение результатов обработки с известными фактическими геологическими условиями (если результаты обработки метода соответствуют обнаженным геологическим телам или

пространственному положению доказанных геологических тел, метод обработки является достаточно разумным).

В этом исследовании после сглаживания, привязки к сетке и приведения к полюсу (этот метод применяется только к магнитным данным) гравитационные и магнитные данные, данные потенциального поля разделяются с помощью продолжения вверх, скользящего среднего, согласованной фильтрации и анализа тренда. Остаточные аномалии, полученные методом скользящего среднего, выбраны в качестве базовых данных для ограниченной инверсии и анализа (Рис. 3В, D).

Гравитационные аномалии Буге в этом районе в основном направлены на северо-запад (рис. 3А). Эти аномалии в целом высоки на юго-западе и низки на северо-востоке с разломом Маеркакули в качестве разделительной линии, которая объективно отражает две региональные геологические структуры: островодужную структуру Ашеле к востоку от разлома и позднепалеозойскую преддуговую впадину Хабахе к западу от разлома. Среди аномалий остаточной гравитации относительно высокие аномалии имеют тенденцию к северо-западу-юго-востоку и в основном распределены в западной и центральной частях исследуемой территории, демонстрируя различные формы, в основном эллиптические, полосчатые и монилиформные, с локальными кольцевидными особенностями (I~ V на рис. 3В). Эти относительно высокие аномалии связаны с широким распространением основных вулканических пород каменноугольного и пермского периодов. Аномалии высокой гравитации в четвертичном покрове в юго-западной части района характеризуются малой амплитудой, небольшим масштабом и незначительными вариациями, а аномалии низкой гравитации, смешанные с аномалиями высокой гравитации, в основном распределены полосами. Некоторые из плоских аномалий совпадают с магнитными аномалиями и, как предполагается, являются погребенными массивами габбро. Аномалии низкой гравитации часто распределены полосами и эллипсами вдоль краев разломов и, как предполагается, являются комплексным откликом плутонов и разломов, а распределение плутонов вдоль разломов указывает на то, что магматическая активность имеет тесную взаимосвязь с разломами. Кроме того, разломы оказывают сильное разрушающее воздействие на ранние слои, что подтверждается различной формой распределения аномалий низкой гравитации в формациях Кие и Ашеле.

Магнитные аномалии имеют различную форму, в основном линейную или эллиптическую, с переменными простираниями и плохой непрерывностью. Сильные магнитные аномалии в основном распределены вблизи восточной, западной и северной границ района исследований (рис. 3С, D). Согласно анализу воздействия на поверхность и

данных о физических свойствах, пришли к выводу, что северная высокая магнитная аномалия была вызвана обнаженным и погребенным полосчатым диабазом. Западные магнитные аномалии распределены в полосах с северо-западным направлением и с севера на юг. Предполагается, что аномалии северо-западного направления являются реакцией кварцевого диорита, а аномалии северо-южного направления являются реакцией на магнитное усиление вулканических слоев, вызванное относительно сильной гидротермальной активностью на краях плутонов. Восточные магнитные аномалии вызваны диоритом, кварцевым диоритом и погребенными магнитными телами. Предполагается, что бисерные магнитные аномалии высокой величины в формации Кангбутибао, в северо-восточном углу района, вызваны открытым и скрытым полосчатым диабазом. Часть исследуемой территории, соответствующая алтайской формации, демонстрирует слабые магнитные аномалии с низким градиентом. Полосчатые магнитные аномалии северо-западного направления в восточно-центральной части района исследований составляют от 100 до 500 нТл, и предполагается, что они являются реакцией спорадически залегающих габбро. Магнитная аномалия в юго-западном углу состоит из множества плоских магнитных аномалий, имеющих сложную форму. Вероятно, это реакция габбро, согласно результатам бурения в этом районе.

#### 4.2.2. Магнитотеллурические данные.

В этом исследовании были запланированы пять основных профилей, включая два профиля, расположенных с севера на юг, и три профиля, расположенных с востока на запад (L1–L5 на рис. 4). Профили были измерены магнитотеллурическим методом и обработаны для получения результатов распределения удельного сопротивления, которые послужили основой для комплексной интерпретации профиля и модификации модели.

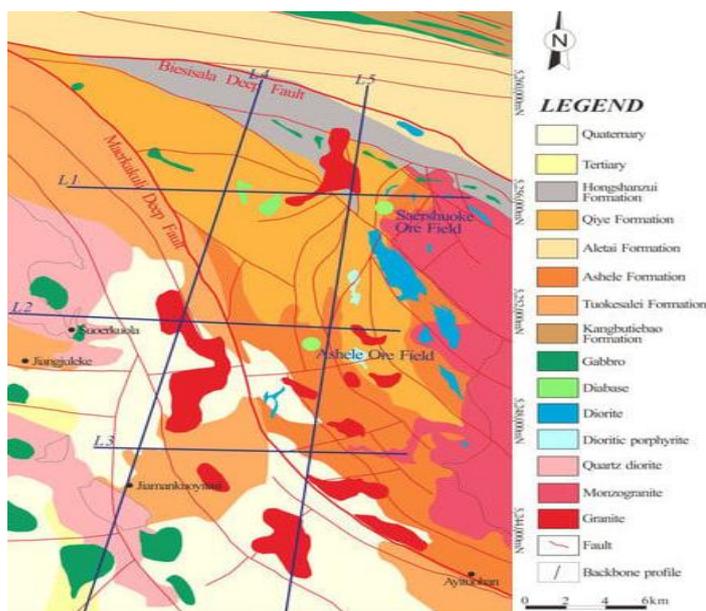


Рис. 4. Положение магнитотеллурических профилей.

Для сбора данных использовалась система MTU-5A, синхронизированная со спутником, с частотным диапазоном 0,001 Гц–32,0 Гц. Время измерения каждой станции превышает 12 часов, а расстояние между станциями составляет около 200 м. Длина линии 1 составляет 10,60 км, а азимутальный угол равен 92° СШ. Длина линии 2 составляет 10,55 км, а азимутальный угол равен 93° СШ. Длина линии 3 составляет 8,60 км, а азимутальный угол равен 92° СШ. Длина линии 4 составляет 20,20 км, а азимутальный угол равен 14° СШ. Длина линии 5 составляет 19,60 км, а азимутальный угол равен 6 ° северной широты. Для обработки собранных данных использовалось профессиональное программное обеспечение SSMT-2000 (2.1.5.0), а полученные данные по удельному сопротивлению приведены к сетке размером 200×200 м.

#### *4.2.3. Интерпретация информации.*

*Интерпретация гравитационных и магнитных данных:* Данные интерпретируются в двух аспектах (интерпретация структуры разломов и интерпретация массива горных пород) на основе статистических результатов физических свойств, результатов инверсии физических свойств с редкими ограничениями, а также геологических данных и данных скважин.

*Интерпретация структуры разломов:* Структуры разломов в этом районе характеризуются многоступенчатой активностью и обычно состоят из множества разломов. Твердые породы и мелкозернистые обломочные породы в зоне разлома сильно фрагментированы и аргиллизированы соответственно, что проявляется как очевидное сочетание аномалий низкой гравитации и низкого удельного сопротивления в зоне гравитационного градиента. Характеристики магнитных аномалий различаются в зависимости от геологических условий, поскольку структуры разломов являются наиболее важными каналами миграции и местами осаждения гидротермальных флюидов. При наличии поздней гидротермальной активности флюидов вдоль структур глубинных разломов или магмато–гидротермальной активности с различными свойствами магнитные аномалии, как правило, демонстрируют сложные характеристики. В этом исследовании были выявлены 34 разлома путем объединения результатов обработки гравитационных, магнитных и магнитоэлектрических данных с геологической, скважинной и другой информацией. Затем были определены длины, тренды и углы падения этих разломов, оцифрованы и отредактированы в трехмерном пространстве (рис. 5). Как показано на 3D-модели, структура разломов в бассейне Ашеле имеет сложную морфологию, что указывает на то, что в этой области наблюдается больше геологических структурных проявлений. Пространственная взаимосвязь между рудными телами и разломами показывает, что области, где разломы

развиваются в исследуемом районе, с большей вероятностью являются благоприятными металлогеническими зонами.

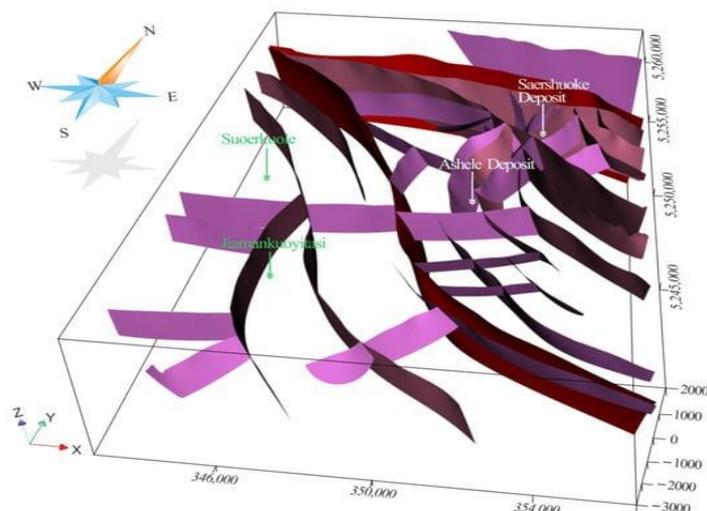


Рис. 5. Трехмерная модель разломов в исследуемом районе. Красные - разлом Маеркакули (юг) и разлом Биесисала (север).

*Интерпретация интрузивных пород:* Промежуточными интрузивными породами в исследуемом районе являются диориты, которые можно грубо разделить на три типа в соответствии с их вещественным составом: пироксеновый диорит, промежуточный диорит и относительно кислый кварцевый диорит (гранитный диорит). Первые два типа в основном характеризуются сочетанием аномалий высокой гравитации, средне-высоких магнитных аномалий и аномалий с высоким удельным сопротивлением, а третий тип в основном характеризуется сочетанием аномалий низкой гравитации, слабых магнитных аномалий или их отсутствия и аномалий с высоким удельным сопротивлением. Согласно статистическим данным о различных физических свойствах, сочетание сильных магнитных аномалий, аномалий высокой гравитации и аномалий высокого удельного сопротивления является типичным признаком присутствия мафито–ультрамафитовых плутонов. В реальном аналитическом процессе геологическая ситуация часто намного сложнее, поэтому идентификация и интерпретация массивов горных пород должны основываться на всестороннем анализе геологического фона и геологических процессов. В общей сложности на исследуемой территории было идентифицировано 26 пород, в том числе 12 интрузивных пород средней кислотности, 4 интрузивных породы средней основности и 10 основных интрузивных пород. Интрузивные породы со средней кислотностью в основном сосредоточены на периферии разлома Маеркакули и зоны разлома Бисисала в середине исследуемой территории. Этот тип пород обычно залегает на большой глубине. К четырем промежуточным породам относятся два диоритовых комплекса, расположенные в южной

части района исследования, и два кварцево-диоритовых комплекса, расположенные на западной границе района исследования. 10 основных пород включают 8 пород габбро и 2 породы диабазы (рис. 4).

#### *Интерпретация магнитотеллурических профилей*

С помощью магнитотеллурической съемки были собраны пять основных профилей на запланированных позициях. Строка 2, профиль съемки, проходящий через рудный район Ашеле в середине бассейна Ашеле, взят в качестве примера того, как интерпретировать магнитотеллурические профили. Интерпретация показана ниже (рис. 6).

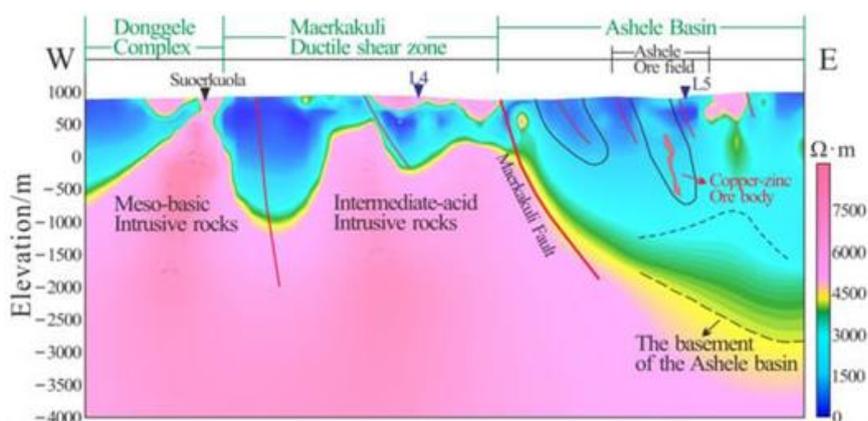


Рис. 6. Результат интерпретации магнитотеллурических данных.

Длина линии 2 составляет 10,55 км. Профиль начинается от плутона Донгтеле на западе бассейна, пересекает зону пластичного сдвига Маеркакули в восточном направлении и выходит на север от Ашеле, а затем проходит через рудный район меди и цинка и входит в район вулканических пород формации Кие к востоку от района добычи. Характеристики неглубоких аномалий высокого и низкого удельного сопротивления указывают на то, что в неглубокой части бассейна имеются структуры разломов с крутым восточным погружением, которые совпадают с известными местоположениями разломов, определенными на основе поверхностной геологической съемки и аномалий гравитационного и магнитного полей, среди которых наиболее заметен разлом Маеркакули. Глубокое положение на западе бассейна представляет собой асимметричную аномалию низкого удельного сопротивления в форме бассейна, уходящую на восток. Фундамент восточного сегмента показывает поднятие с высоким удельным сопротивлением, западная граница которого поднята к востоку, а поверхность сложена обнаженными вулканическими породами формации Ашеле. Аномалия с низким удельным сопротивлением простирается примерно на 1600 м в глубину. Северный сегмент главного рудного тела медного рудника Ашеле расположен на восточной стороне аномалии низкого удельного сопротивления в форме бассейна. Залежи медной руды в северной части Ашеле обнажены на западной стороне аномалии в форме бассейна, а

известные минерализованные тела в глубокой части объекта подтверждены скважинами. Неглубокое высокое удельное сопротивление соответствует вулканическим породам формации Кие на поверхности. Другие четыре основных профиля также подробно анализируются один за другим.

## 5. Построение модели.

### *Построение двумерной геологической модели.*

Взяв в качестве примера строку 2, описывается процесс построения профилей магистрали. Сначала выводится и рисуется исходный 2D геологический профиль. Распределение поверхностных геологических единиц ограничено поверхностной геологической картой, а протяженность и распределение глубинных геологических тел ограничены данными скважин и магнитотеллурическими профилями. Интерпретация магнитотеллурического профиля предоставляет базовую информацию для начального 2D геологического профиля, такую как формы кварцевого диорита и габбро на западе профиля, формы гранита в середине профиля, глубина фундамента бассейна Ашеле и расположение некоторых разломов, которые являются важной основой для установления начального геологического профиля.

Затем, на основе исходного геологического профиля, создается 2.5D модель, и прямые и инверсионные вычисления выполняются с использованием ModelVisionPro™ от Encom. На основе остаточной гравитации и магнитных аномалий модель и физические параметры непрерывно модифицируются взаимодействием человека и машины до получения приемлемой геологической модели и удовлетворительного эффекта подгонки (рис. 7). Остальные четыре основных профиля построены тем же методом.

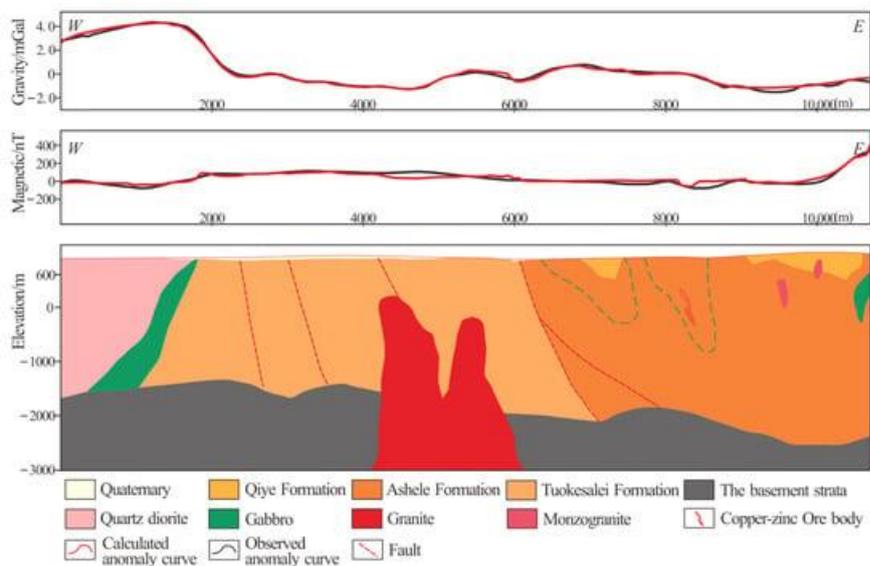


Рис. 7. Выбранный профиль (L2 на рис. 4), показывающий совместное гравитационное и магнитное моделирование в 2D.

*Построение трехмерной геологической модели.*

Пространство моделирования представляет собой кубоид, протяженностью восток–запад 13,7 км, север–юг 22,3 км и высотой от 2000 до -3000 м. Моделирование включает 18 геологических единиц, и хронологический порядок геологических единиц и контактные отношения между ними определяются одновременно.

Пять перевернутых и скорректированных геологических профилей магистрали, поверхностные геологические карты и топографические данные вводятся в пространство моделирования, а методы визуализации и интерполяции используются для соединения границ одной геологической единицы для создания 3D-геологической модели (GeoModeller™ 4.2.0).

*Трехмерная инверсия с ограничениями.*

Полученная 3D геологическая модель преобразуется в модель физических свойств путем введения физических параметров. Затем модель физических свойств привязывается к ячейкам сетки размером 200×200×50 м с учетом 3D гравитационной и магнитной инверсии. Гравитационная инверсия является фокусом инверсии, магнитная инверсия является вспомогательной.

Настройки параметров физических свойств относятся к диапазонам изменений, определенным в результате анализа, и вводятся в программное обеспечение inversion в виде средних и среднеквадратичных ошибок в качестве важных ограничений при инверсии физических свойств.

Когда данные вводятся в программное обеспечение для моделирования, все виды данных разделяются на четыре категории (наблюдаемые, предполагаемые, интерпретируемые и неуказанные) в соответствии с источниками данных, а ограничивающая информация, такая как данные бурения, геологические карты поверхности и профиль, разделяется на ту же категорию (наблюдаемые). В процессе инверсии эта категория данных настраивается так, чтобы положение границы оставалось неизменным с помощью программного обеспечения (GeoModeller™ 4.2.0). В целом, границы геологических тел, включенных в поверхностные геологические карты, профили, скважины и т.д., служат ограничениями и остаются неизменными в процессе инверсии.

После инверсии измеренные гравитационные и магнитные данные сравниваются с данными, смоделированными методом прямого моделирования, и модель корректируется в областях с большой разницей в форме (fitdifference) между ними. Сначала проверяется рациональность физических параметров. Например, проверяется, существовали ли особые

геологические условия в несовпадающих районах, такие как изменения физических свойств (альтерация, окремнение и т.д.) одной и той же литологии из-за различных геологических условий. Если изменения физических свойств не являются причиной несоответствия, границы соответствующей геологической единицы корректируются путем постепенного добавления вспомогательных участков для уменьшения ошибки подгонки при 3D-инверсии, и модель пересматривается неоднократно, пока измеренные данные не будут хорошо соответствовать данным, смоделированным методом прямого моделирования (рис. 8 и 9).

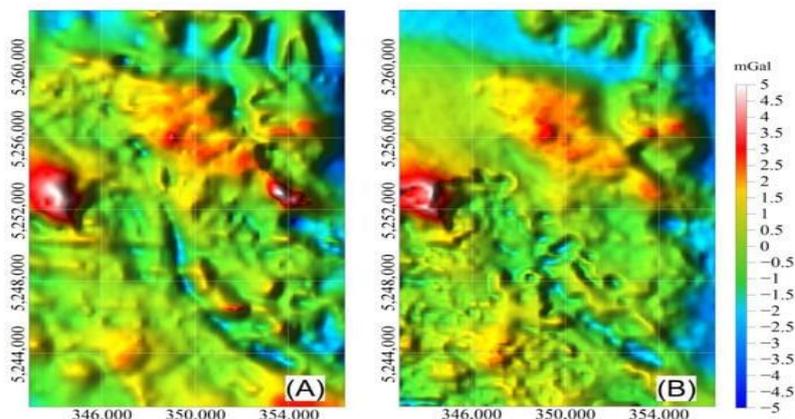


Рис. 8. Сравнение между (А) наблюдаемыми и (В) рассчитанными откликами Буге на основе 3D-моделирования.

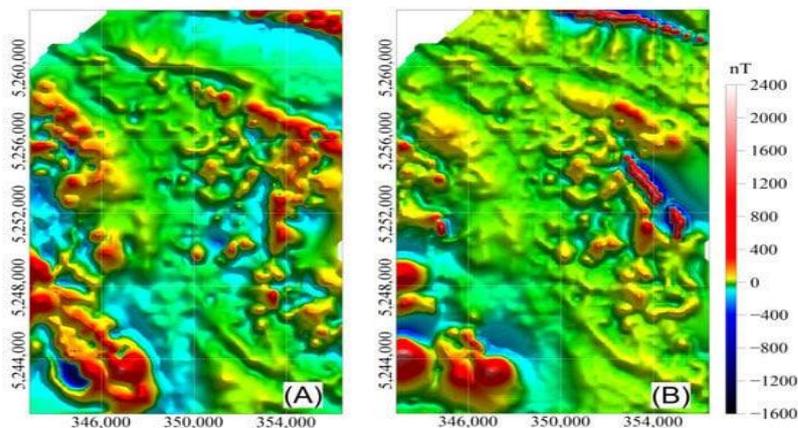


Рис. 9. Сравнение между (А) наблюдаемыми и (В) рассчитанными магнитными откликами на основе 3D-моделирования.

Окончательная ошибка подгонки данных о гравитации составляет 0,3919 мГал, что указывает на удовлетворительную общую подгонку. Большие ошибки подгонки сосредоточены в юго-восточном углу района съемки. Погрешность подгонки магнитных данных составляет 90,94 нТл, и их относительно большие ошибки расположены на краю юго-западного угла района съемки.

Было построено в общей сложности 10 вспомогательных разрезов, включая четыре плоскости и шесть профилей. Вспомогательные разрезы в основном используются для точного изображения форм plutонов, а глубины plutонов определяются на основе буровой

информации или результатов анализа профилей магистрали. Конкретные функции вспомогательных секций включают (1) упрощение базовых профилей для управления пространственными формами геологических тел; (2) дополнение пробелов, вызванных разреженной информацией в некоторых областях; и (3) облегчение контроля форм геологических структур в периферийных областях и исправление краевого эффекта, вызванного базовыми данными.

## 6. Результаты и обсуждение.

### 6.1. Структурные характеристики трехмерной модели.

С помощью программного обеспечения для визуализации окончательная 3D геолого–геофизическая модель рудного района Ашеле (рис. 10) представлена с разных точек зрения. 3D-модель наблюдается и анализируется под разными углами и на разных расстояниях, и каждая геологическая единица кратко описывается следующим образом (рис. 11):

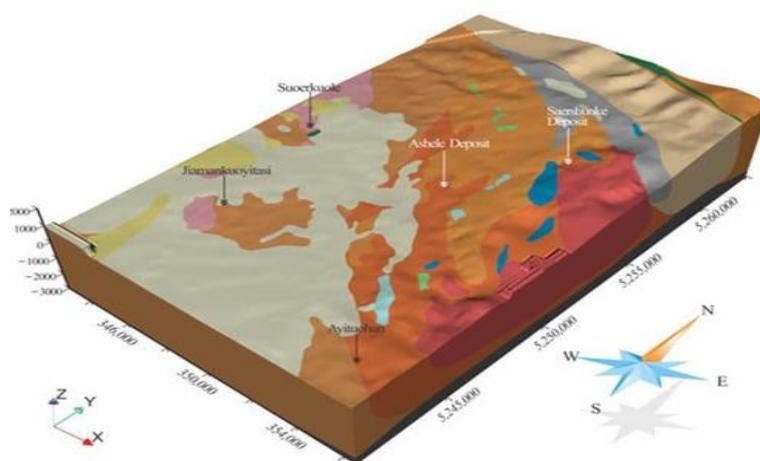


Рис. 10. Трехмерная геолого–геофизическая модель рудного района Ашеле (оси X, Y и Z указаны в метрах, условные обозначения такие же, как на рис. 4).

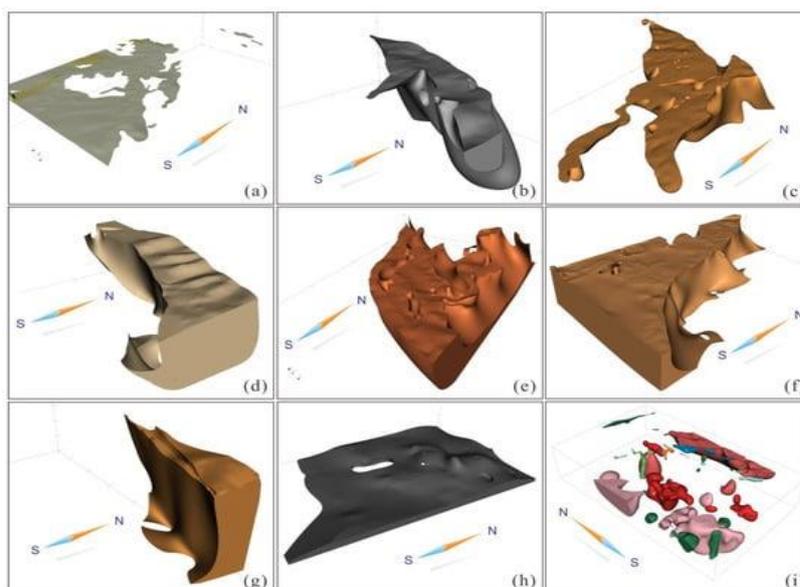


Рис. 11. Трехмерная модель геологических единиц: (a) четвертичные и третичные слои. (b) формации Хуншаньцзуй. (c) формации Кие. (d) Алтайской формации. (e) Формации Ашеле. (f) формации Туокесалей. (g) формации Канбутибао. (h) Слои фундамента. (i) Массив горных пород.

*Четвертичные и третичные пласты* в исследуемом районе в основном сосредоточены на юго-западе района исследований, мощностью обычно  $\leq 100$  м.

*Формация Хуншаньцзуй*, как правило, имеет тенденцию к северо–западу–юго-востоку и имеет распределение в форме челнока. Формация постепенно утоньшается с юго-востока на северо-запад и исчезает в северо-западном углу исследуемой территории. Формация находится в разломном контакте с формацией Кие и Алтайской формацией.

*Формация Кие*, как правило, имеет тенденцию к северо–западу–юго-востоку и имеет треугольное распределение. Ее южный сегмент перекрывает формацию Ашеле. Мощность формации Кие сильно варьируется, но в целом больше на востоке, чем на западе, и больше на севере, чем на юге. В формации Ашеле имеются локальные разломные структуры.

*Алтайская формация* имеет почти восточно-западную направленность и вытянутое распределение. Ее мощность обычно превышает 2000 м и относительно больше на востоке, но в остальном она не отличается значительными пространственными вариациями.

*Формация Ашеле* имеет плоское распределение с севера на юг в форме перевернутого треугольника. Юго-западная сторона формации ограничена разломом Маеркакули и находится в контакте разлома с формацией Туокесалей. Восточная сторона формации ограничена плутоном Хабахе и имеет тенденцию распространяться за пределы района в его глубинной части. Центральная часть северного сегмента формации (к северу от Ашеле) слегка простирается на север, в то время как восточная и западная стороны северного сегмента формации в определенной степени простираются на северо-запад и северо-восток. Мощность южного сегмента формации обычно превышает 2000 м, что больше остальной

части формации. Модель показывает, что в формации Ашеле имеется очевидная W-образная складчатая структура. Рудные районы Ашеле и Саершуоке расположены на антиклинали крупной складчатой структуры. В формации Ашеле имеются локальные разломные структуры, большинство из которых имеют северо-западный тренд. На поверхности обнажено много промежуточных плутонов, а в глубинной части находится много погребенных плутонов с промежуточным содержанием кислых пород.

*Формация Туокесалей* ограничена разломом Маеркакули на северо-востоке, и большая часть формации покрыта четвертичным и третичным покровами. Эта формация имеет относительно большую и равномерную мощность, более 3000 м в исследуемом районе. Формация содержит много погребенных плутонов среднего и основного состава, но лишь несколько структур разломов (в основном разлом Маеркакули и его вторичные структуры), которые в основном направлены на северо-запад.

*Формация Кангбутибао*, расположенная в северо-западном направлении, находится в северо-восточном углу исследуемой территории и имеет вытянутое распределение. Максимальная мощность составляет приблизительно 2000 м, и в пласте имеются локальные интрузии диабазы.

*Фундамент* в целом, выше на севере, чем на юге, и выше на западе, чем на востоке. Он имеет очевидное поднятие в бассейне Ашеле. Максимальная мощность фундамента в районе моделирования составляет приблизительно 1000 м, а юго-западный сегмент фундамента простирается на большие глубины.

*Плутоны:* Результаты визуализации 3D-модели четко указывают на форму распределения, глубину и масштабы плутонов. Плутоны на восточной и западной сторонах исследуемого района являются продолжением плутонов Хабахе и Донггеле. Эти два плутона большие. Максимальная глубина плутона Донггеле в этом районе превышает 3500 м, а максимальная глубина плутона Хабахе превышает 2500 м. Много погребенных и полупогруженных плутонов, включая плутоны габбро, диабазовые плутоны, плутоны кислых гранитов, плутоны монцонитовых гранитов, плутоны промежуточных диоритов, плутоны кварцевых диоритов и т.д. Плутоны габбро в основном расположены на западном краю района и к югу. Плутоны габбро относительно крупные. Большинство из них представляют собой столбчатые и монилиформные интрузии в пластах, некоторые из них выходят на поверхность, и большинство из них представляют собой погребенные плутоны с относительно небольшой глубиной захоронения (<1000 м, в основном вблизи поверхности). Диабазовые плутоны находятся в основном в северо-восточном углу исследуемой территории и представляют собой жильноподобные интрузии северо-западного направления в формации

Кангбутиебао с максимальной глубиной около 200 м. Плутоны кислого гранита в основном расположены вблизи разлома Маеркакули, с различными масштабами (плутоны кислого гранита в глубинной части относительно крупнее) и различной формой (в основном столбчатые, сталагмитовые, монилиформные, полосообразные или седловидные интрузии в пластах). Промежуточные диоритовые плутоны в основном расположены на востоке и севере района и в основном выходят на поверхность, демонстрируя полосчатое распределение, и обычно залегают на глубине менее 500 м.

### ***6.2. Прогнозная информация.***

В рудном районе Ашеле существуют различные типы оруденения, включая слоистую медно–цинковую и баритовую минерализацию, образованную струйным осаждением, жильную медную (цинковую) и медно-свинцово–цинково–серебряную минерализацию, образованную в разломных зонах, жильную золото–медно-свинцово–цинковую и медную минерализацию в субвулканических породах, медную минерализацию в зоне контакта субвулканических пород и медная минерализация в разломах или трещинах. Эти минерализации обнаружены в девонской формации Ашеле, которая является основным рудовмещающим горизонтом, и схема глубинного распределения формации может быть важным ориентиром для поисков руды. 3D-модель показывает, что формация Ашеле на северной стороне района в основном простирается до глубокой части, поэтому медно–цинковое рудное тело Ашеле, вероятно, продолжается на север до глубокой части. В районе, где расположено полиметаллическое месторождение Саершуоке, его рудовмещающие пласты формации Ашеле в основном продолжают на восток в глубинной части, поэтому направление поисков также должно быть восточным. Все это указывает направления дальнейших поисковых работ.

На основе данной 3D-модели анализируется пространственное распределение пластов, плутонов, разломов и т.д. и выделяются три глубинных металлогенически перспективных района, а именно перспективный район Чжуангайи, северный перспективный район Ашеле и восточный перспективный район Саершуоке, на основе типизации рудных месторождений (рис. 12).

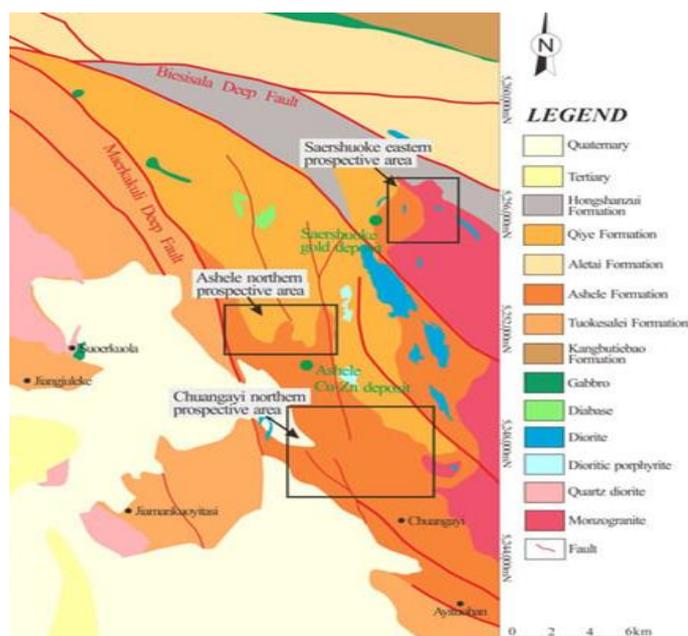


Рис. 12. Металлогенически перспективные участки рудного района Ашеле.

### 6.3. Обсуждение.

Технология 3D геолого–геофизического моделирования позволяет проследить глубинное распределение металлогенических геологических тел и визуализировать рудоконтролирующие структуры для прогноза оруденения, но предлагаемый метод имеет ограничения. Например, точность магнитной инверсии нуждается в улучшении. Основная причина заключается в том, что в исследуемом районе было несколько эпизодов сильной тектонической активности, из-за чего магнитные свойства одного и того же типа стратиграфической единицы сильно различаются в разных местах региона. Следовательно, необходимо провести более детальное исследование физических свойств с использованием большего количества единиц моделирования и большей плотности сетки для повышения точности подгонки инверсии, но это также означает увеличение рабочей нагрузки и времени вычислений. Цели исследования и другие факторы, такие как масштаб и точность исходных данных, должны быть всесторонне рассмотрены, чтобы сформулировать разумную конечную точность инверсии.

### 7. Выводы.

1. В ходе исследования была создана трехмерная геолого–геофизическая модель рудного района Ашеле до глубины 5000 м, впервые была реализована “прозрачность” района и получены трехмерные пространственные распределения 9 формаций, 10 типов плутонов и 34 разломов, что является основой для поисковых работ.

2. Результаты исследования помогают получить более четкое представление о глубинной геологической структуре и трехмерном распределении разломов и плутонов в исследуемом районе, что улучшает понимание основных геологических и металлогенических закономерностей, что обеспечивает поддержку проведения поисковых работ на скрытое оруденение.

3. В сочетании с существующими данными о типизации месторождений, прогнозируются три металлогенически перспективных района, что указывает направление дальнейших поисков. Это исследование может послужить ориентиром для поисковых работ на площадях с ограниченными данными.

4. Предложенный метод и процесс моделирования хорошо применимы к построению 3D-моделей рудных районов с относительно скудными данными и сложными геологическими условиями. Постепенное добавление вспомогательных разделов может более разумно и эффективно модифицировать модель в соответствии с измеренными аномалиями, тем самым эффективно сокращая время моделирования. Использование вспомогательных участков с произвольными направлениями, углами падения, глубинами и длинами позволяет в полной мере использовать известную информацию и учитывать изменения в геологических единицах в разных направлениях для более точного отражения фактических геологических условий.

## V. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ СИСТЕМ IOCG (районы Вале-ду-Кюрасас и Риачо-ду-Понтал, Бразилия) [5].

### 1. Введение.

Месторождения IOCG мирового класса (оксид железа, медь-золото и др.) проявляют свой металлогенический след в различных тектонических условиях за счет переменных объемов сопутствующих гидротермально-метасоматических изменений вмещающих пород сопровождающих оруденение, которые могут быть выявлены геофизическими методами. Минерализация IOCG часто контролируется зонами сдвиговых систем и включает высокие концентрации магнетита и/или гематита. Магнитные и гравитационные характеристики, связанные с богатыми магнетитом и гематитом рудными зонами, используются в качестве эффективного поискового инструмента новых месторождений IOCG. Часто геометрия и условия локализации минерализованных трендов связаны со вторичными структурами. Рудные тела структурно контролируются зонами растяжения, связанными с региональными сдвигами. Эти важные геологические особенности минерализации IOCG часто выражаются в изменениях физических свойств, связанных с плотностью, намагниченностью и сейсмическими скоростями в широком диапазоне масштабов.

Геологические характеристики месторождений IOCG Карачас мирового класса различны и демонстрируют сложное взаимодействие между геологическими структурами, потоками флюидов и характером гидротермальных изменений [вмещающих пород. Например, поток минерализованных флюидов вдоль региональных сдвиговых зон отвечает за структурный рисунок “сигмоидальной формы” и магнитную сигнатуру провинции Карачас и района Вале-ду-Кюрасас (Бразилия).

В рудных районах Вале-ду-Кюрасас и Риачо-ду-Понтал медь является основным сырьевым объектом наряду с Au, Fe, Cr и другими металлами. Ранние исследования характеризовали месторождения меди как магматические. Минерализация сосредоточена исключительно в ортопироксените. Однако высокие концентрации сульфидов также могут встречаться в богатых норитом и биотитом сдвиговых карбонатных породах. Недавно новые геологические, тектонические, изотопные и геохимические исследования показали, что медная минерализация связана с разнообразным семейством месторождений IOCG. За последние 10 лет были завершены аэрогеофизические исследования с высоким разрешением. Однако, несмотря на увеличение современного аэрогеофизического охвата и геологического картирования, темпы открытия и идентификации новых месторождений IOCG остаются низкими. Такой низкий уровень обнаружения частично объясняется отсутствием

современного подхода к минеральным системам. Существуют также дополнительные проблемы, в основном связанные с поисками «скрытых» месторождений.

Меднорудные районы Вале-ду-Кюрасас и Риачо-ду-Понтал (рис. 1) считаются одними из наиболее важных с точки зрения перспектив ЮСГ в Бразилии.

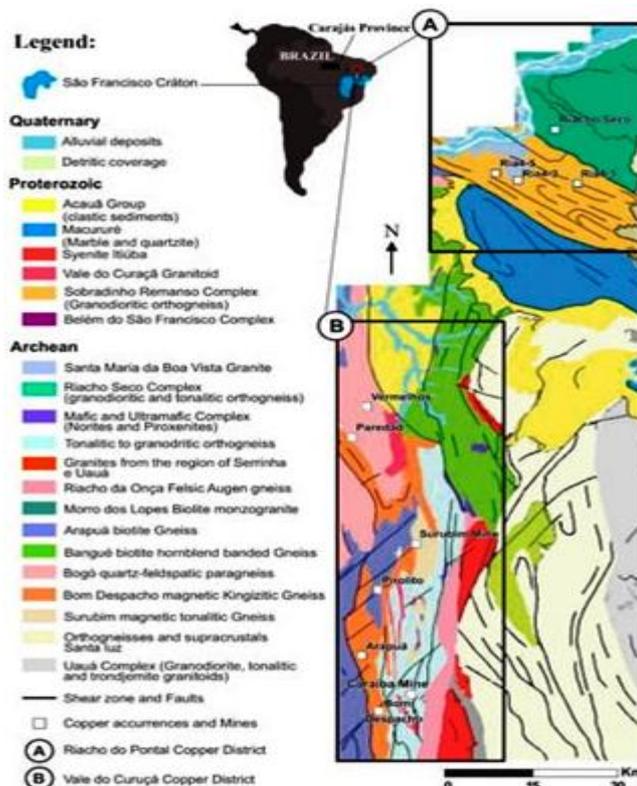


Рис. 1. Геологическая карта с рудными районами Риачо-ду-Понтал (А) и Вале-ду-Кюрасас (В).

В частности, медный район Вале-ду-Кюрасас, занимающий площадь около 2000 км<sup>2</sup>, является одним из наиболее значительных горнодобывающих районов Бразилии, где в 2018 году было добыто 30 тыс. тонн меди. На карту нанесено около 300 месторождений меди. В районе в общей сложности ежегодно добывается 42,4 млн тонн меди со средним содержанием 1,71%. Наиболее крупными месторождениями меди в Вале-ду-Кюрасас являются Карамба-Пилар (24,8 млн тонн при 1,9% меди), Вермельос (4,52 млн тонн при 3,4% меди) и Сурубим (4,5 млн тонн при 1,04% меди).

Для выявления новых перспективных областей ЮСГ вдоль северной границы кратона Сан-Франциско использовались многопараметрические геологические, геохимические, аэрофотогеофизические, а также данные дистанционного зондирования (ДДЗ).

Данное исследование расширяет предыдущие тремя различными способами.

*Во-первых*, магнитные и гравитационные карты интерпретируются совместно с новой геологической информацией для отображения глубинных слоев литосферы, контролирующей минерализацию меди.

*Во-вторых*, региональные магнитные и гравитационные данные инвертируются для получения 3D-моделей магнитной восприимчивости и плотности соответственно, чтобы понять «скрытую» геологию, связанную с распределением физических свойств и геометрией, лежащими в основе рудных районов.

*В-третьих*, анализируются данные сейсмической томографии, позволяющие поместить IOCG районы Вале-ду-Кюрасас и Риачо-ду-Понтал в тектонический каркас и охарактеризовать потенциальные возможности контроля рудных районов.

Цель исследования - использовать эти подходы для лучшего понимания глубинных структурных элементов земной коры и литосферы, контролирующих процессы палеопротерозойской и неопротерозойской минерализации, для получения более глубокого представления о минеральных системах, которые контролировали размещение рудных районов IOCG на северо-востоке Бразилии. Для ее достижения был выполнен синтез региональных данных магнитной, гравитационной и сейсмической томографии с геологической информацией для оценки 2D и 3D геологических и тектонических условий формирования IOCG районов Вале-ду-Кюрасас и Риачо-ду-Понтал.

## **2. Геологическое строение и минерализация.**

Ранние исследования медного рудника Карайба в районе Вале-ду-Кюрасас подчеркивали ортомагматические процессы, ответственные за генезис медной минерализации. Отмечено, что необычные аспекты месторождения Карайба имеют сходство с другими месторождениями меди магматического происхождения, включая (а) присутствие первичных сульфидов, таких как борнит и халькопирит; (b) наличие большого количества (>50 мас. %) магнетита; (c) высокое соотношение Cu/Ni (~ 40); и (d) ортопироксениты с обилием биотита, относящиеся к зонам сдвига. Важность метасоматических процессов в генезисе месторождения Карайба подтверждает что месторождения меди в медном районе Вале-ду-Кюрасас аналогичны другим месторождениям IOCG по всему миру.

Ранние исследования месторождений меди в районе Риачо-ду-Понтал, показывают, что они характеризовались как вулканогенно-массивные сульфидные (VMS). Для их классификации как месторождений IOCG были использованы следующие критерии: (а) сильная связь с изменением калия и альбита; (б) медная руда гидротермального и эпигенетического происхождения, которая тесно связана с зонами сдвига; (в) присутствие гидротермальных оксидов железа, пространственно и временно связанных с медными рудными телами; (d) минерализация, пространственно не связанная с ближайшими гранитами; и (е) магнетит или гематит (гидротермальное содержание железа > 10%).

Геология медного района Вале-ду-Кюрасас (В на рис. 1) состоит в основном из горных пород, относящихся к орогену Итабуна-Сальвадор-Кюрасас (ISCO). ISCO расположен к востоку от блоков Гавиан и Жекие и к западу от блока Серринья (рис. 2) и представляет собой 800-километровый пояс высокометаморфических гранулитовых пород от архея до палеопротерозоя.



Рис. 2. Геологическая схема районов Риачо-ду-Понтал и Вале-ду-Кюрасас.

Сдвиговые зоны района Вале-ду-Кюрасас характеризуются двумя фазами прогрессирующей деформации: (а) Фаза (D1) включала структуры транспрессивного надвига, демонстрирующие конвергенцию к западу. Связанный с этим метаморфизм произошел в амфиболитовой и гранулитовой фациях; (б) Фаза D2 была связана с зонами сдвига с изоклинальными складками N-S и структурами проникающего вертикального сдвига.

Эти зоны сдвига были ответственны за размещение милонитизированных гранитов. Процесс сдвига разрушил ранее существовавшую структуру. Слоистость зон сдвига имеет простирание  $350^\circ$  и наклон к юго-востоку от  $45^\circ$  до  $75^\circ$ . Основное событие минерализации в районе Вале-ду-Кюрасас произошло примерно между 2050 и 2010 годами млн лет назад.

Геология рудника Караиба связана с контактом ортогнейсов и ультрамафитовых пород. Вмещающие породы включают полосчатый гнейс, диопсидит, форстеритовый мрамор, гранатсодержащий матовый гранулит, биотитовый сланец и железистые образования.

Рудное тело Караиба расположено в мафито-ультрамафитовом комплексе с признанными гидротермальными кальциево-железистыми изменениями, связанными с меднорудными зонами. Существует ранняя ( $2580 \pm 10$  млн лет назад) ортомагматическая минерализация, на которую более поздним гидротермальным событием наложена минерализация ЮСГ около 2 млрд лет назад.

Рудные минералы в Караибе включают халькопирит, борнит и халькоцит, которые обычно связаны с магнетитом. Кучевые кристаллы рассеянного халькопирита, борнита и магнетита, выросшие в промежутках пироксенов и амфиболов, составляют первичную

(магматическую) минерализацию. Минералы, связанные с гидротермальными изменениями, включают биотит, микроклин, эпидот, хлорит, магнетит и кварц. Руда встречается в виде прожилков или магнетитовой гидротермальной брекчии. Магнетит встречается в равновесии со шпинелью. Часто ильменит замещается халькопиритом, борнитом и магнетитом, особенно когда вмещающей породой является биотит-милонит. Магматический ильменит заменен гидротермальным ильменитом. Последняя система ЮСГ богаче медью, обладает высокой магнитностью и плотностью.

*В рудном районе Риачо-ду-Понтал* обнаружено более двадцати залежей меди (А на рис. 1). Геологически эти залежи в основном расположены в зоне контакта между провинцией Борборема и кратоном Сан-Франциско (рис. 2).

Район представляет собой небольшую плиту коллизионной зоны Бразилиано (ок. 750-570 млн. лет назад), которая образовалась во время конвергенции нео- и мезопротерозойских блоков с кратоном Сан-Франциско. Коллизионная зона Бразилиано отмечена гравитационной аномалией, обрамленной аномальными минимумами.

Залежи меди структурно контролируются зонами сдвига. На месторождениях было выявлено несколько типов изменений, связанных с гидротермальными процессами. Гидротермальные изменения привели к повсеместному распространению кальциево-калиевых и кальциево-железистых изменений вмещающих гнейсов и мигматитов. Процессы гидротермального изменения привели к замене метаморфических минералов в полосчатом гнейсе комплексом минералов, включая альбит, биотит, гематит и амфибол. Эти замещающие минералы пространственно связаны с проникающей деформацией сдвига, а рудные зоны погружаются параллельно линиям растяжения вдоль зон сдвига. Пирит, халькопирит и халькоцит относятся к основным сульфидным минералам, обнаруженным в рудных зонах. Магнетит и/или гематит обычно встречаются в ассоциации с минералами меди.

На район Риачо-ду-Понтал наложили отпечаток два основных сдвиговых события: (а) D1 - надвиговые зоны со сходимостью к северу, представляющие серию параллельных структур с северо-западным направлением, связанные с гидротермальными изменениями и минерализацией; и (б) D2 - сдвиговые зоны правого простирания, связанные с многократной реактивацией. Слоистость зон сдвига имеет простирание  $320^\circ$  и падение к северо-востоку  $60-75^\circ$ .

Для сравнения: рудные провинции и районы ЮСГ в Бразилии и Африке расположены вдоль границ крупных блоков земной коры в неопротерозойских орогенных поясах (рис. 3).



Рис. 3. Провинции и районы IOCG, расположенные в Бразилии и Африке: основные блоки земной коры и неопротерозойские орогенные пояса в Южной Америке и Африке.

В Бразилии есть по крайней мере три металлогенические провинции IOCG с разным возрастом, которые включают провинцию Каракас (ок. 2,72 млрд лет назад и ок. 2,5 млрд лет назад), район Вале-ду-Кюрасас (ок. 2 млрд лет назад) и неопротерозойские (ок. 750–570 млн лет назад) районы Риачо-ду-Понтал.

### 3. Использованные геофизические данные.

Данные о гравитации и магнитных аномалиях на площади 7500 км<sup>2</sup> были извлечены из общедоступных баз данных. Из базы данных gravity было извлечено 60 гравитационных точек, расположенных в среднем на расстоянии от 8 до 15 км, которые были использованы для этого исследования (рис 4).

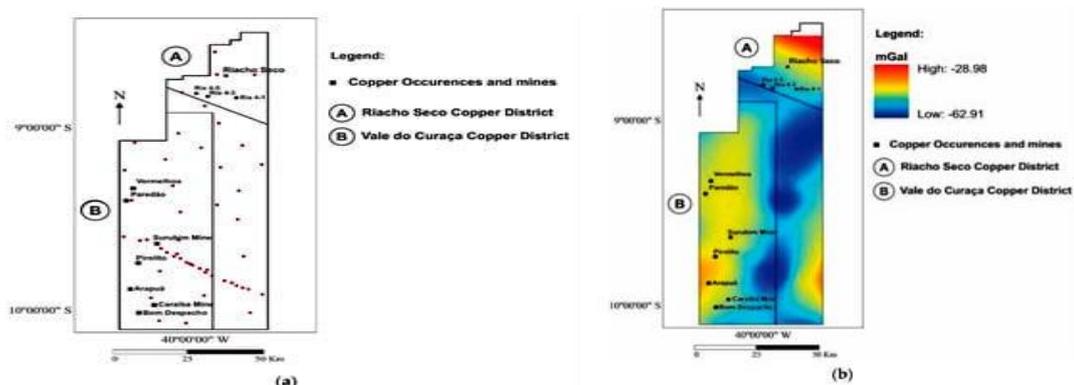


Рис. 4. (а) Гравитационные станции и (б) гравитационная карта Буге. А: район Риачо-ду-Понтал; В: район IOCG Вале-ду-Кюрасас.

Учитывая большой разброс гравитационных данных, ожидалось, что источники плотности земной коры, залегающие на глубинах 5 км и ниже, будут эффективно обнаружены. Данные о гравитации были привязаны к сетке размером 500 м с применением

алгоритма минимальной кривизны (рис. 4б). Гравиметрическая сигнатура довольно различна в обоих районах, в то время как Вале-ду-Кюрасас ассоциируется с высокой гравиметрической сигнатурой, район Риачо-ду-Понтал ассоциируется с менее высокой (рис. 4б).

Данные о аэромагнитных аномалиях собирались на номинальной высоте над землей 100 м вдоль линий пролета N–S на расстоянии 500 м с линиями привязки E–W через каждые 10 000 м. Всего было собрано 48 641 км магнитных данных. Данные о суммарном магнитном поле (ТМІ) были нанесены на 250-метровую сетку (рис. 5).

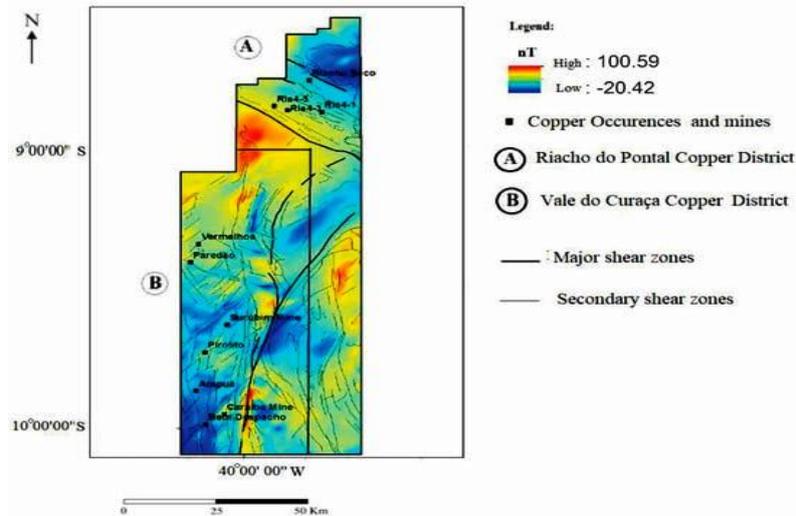


Рис. 5. Схема общей магнитной напряженности (ТМІ). А. район Риачо-ду-Понтал; В. район Вале-ду-Кюрасас.

Учитывая расстояние между линиями магнитных съемок и высоту, на которой проводились измерения магнитного поля, ожидали обнаружить магнитные источники в земной коре, которые залегают на глубинах 400 и более м. Разрешение по горизонтали составляет 200 м.

Градиентные магнитные функционалы рассчитаны на основе сетки ТМІ для усиления магнитных вариаций и линеаризации, связанных с геологическими структурами, отображения магнитных сигнатур измененных и неизмененных пород и идентификации магнитных сигнатур, связанных с глубинными магнитными источниками. Данные ТМІ были приведены к северному магнитному полюсу (RTP) с использованием наклона  $-20^\circ$  и склонения  $-22,31^\circ$ . Сетка RTP была продолжена до высоты 1000 м над местностью, чтобы уменьшить шум, вызванный низкой геомагнитной широтой, и улучшить магнитные характеристики более глубоких источников (рис. 5).

Сетка данных RTP с продолжением вверх использовалась для расчета угла наклона общего горизонтального уклона (ТАНГ). Преобразование ТАНГ четко определяет следы высоких градиентов аномалий, которые отображают магнитные контрасты, связанные с

геологическими структурами на различных глубинах (рис. 6а). Линии хребта ТАХГ, обозначающие основные геологические структуры, показаны относительно карты гравитационных аномалий (рис. 6б). Крупные медные рудники Ria 1-5 расположены в четко очерченных аномалиях магнитного поля юго-северо-запада. Минерализация меди связана со сдвиговыми движениями и проявлениями магнетита и гематита. Следует ожидать, что магнитные аномалии коррелируют с медными рудниками и имеют сдвиговые направления простирания.

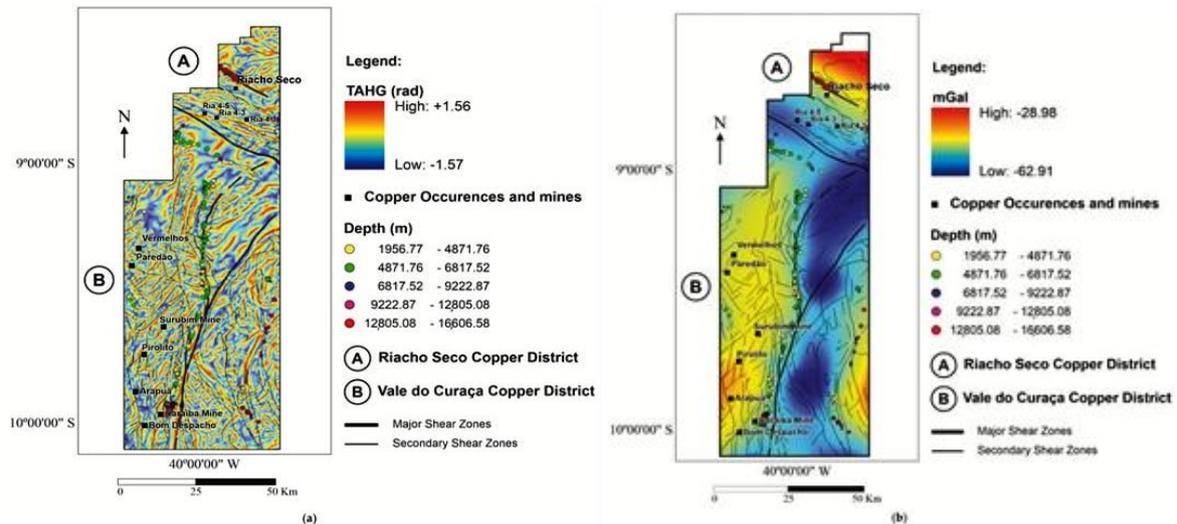


Рис. 6. (а) Карта угла наклона горизонтального градиента (ТАНГ) данных о магнитной аномалии RTP. (б) Карта гравитационных аномалий Буге с основными и вторичными структурами сдвига и следами ТАНГ. Обе карты содержат оценки магнитных структур и их глубины до магнитного источника в виде цветных кружков. Глубины до магнитных структур были рассчитаны с использованием метода деконволюции Эйлера. А: район Риачо-ду-Понтал; В: район Вале-ду-Кюрасас.

Решения по деконволюции Эйлера были рассчитаны на основе сетки данных о магнитных аномалиях, и глубины до магнитного источника (структурный индекс=0) показаны вдоль основных зон сдвига. Структурный индекс=0 достаточен для определения верхней части мощной плиты.

*Данные о магнитной восприимчивости и плотности были получены из кернов скважин и поверхностных образцов горных пород.*

Измерения представлены в виде восприимчивости в СИ (интенсивности восприимчивости) $\times 10^{-3}$  и плотности в  $\text{г/см}^3$ . Магнитная восприимчивость измерялась с помощью измерителя магнитной восприимчивости KT10 PLUS, а плотность пород измерялась путем вакуумирования образцов с использованием гидростатических весов. В течение полевых сезонов было исследовано 33 образца керна для определения плотности и восприимчивости по образцам, собранным в рудном районе Риачо-ду-Понтал, и 11 образцов горных пород были взяты с обнажений и рудников района Вале-ду-Кюрасас (рис. 7).

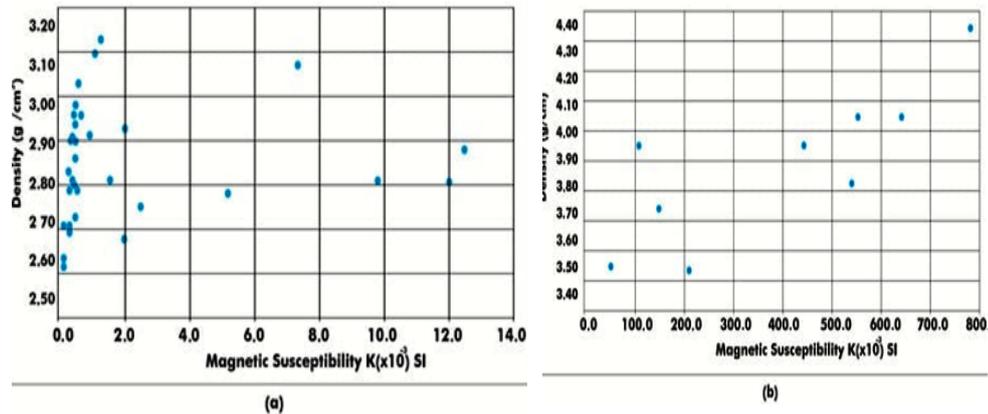


Рис. 7. (а) Тридцать три образца, измеренные на плотность и восприимчивость из района Риачо-ду-Понтал, (b) 11 образцов, измеренных на плотность и восприимчивость из района Вале-ду-Кюрасас.

Плотности, обнаруженные для рудного района Риачо-ду-Понтал, характерны для гнейсов (табл. 1).

Табл. 1.

Типы горных пород и глубина залегания образцов из района Риачо-ду-Понтал.

PCB-RIA4-DH01	Depth (m)	Rock Type	PCB-RIA4-DH02	Depth (m)	Rock Type
PETRO-01	1.85	Quartz-magnetite-biotite mylonite	PETRO-21	2.75	Amphibole biotite gneiss
PETRO-02	5.50	Quartz vein	PETRO-22	10.60	Quartz vein
PETRO-03	8.70	Biotite mylonite	PETRO-23	14.30	Quartz vein
PETRO-04	10.70	Biotite mylonite	PETRO-24	26.30	Quartz vein
PETRO-05	13.00	Biotite mylonite	PETRO-25	31.80	Quartz vein
PETRO-06	21.00	Biotite mylonite	PETRO-26	45.69	Quartz vein
PETRO-07	25.50	Biotite mylonite	PETRO-27	60.00	Quartz vein.
PETRO-08	32.48	Quartz biotite gneiss	PETRO-28	73.10	Biotite quartz vein.
PETRO-09	67.70	Quartz biotite gneiss	PETRO-29	83.60	Quartz vein
PETRO-10	105.30	Quartz biotite gneiss	PETRO-30	103.50	Quartz vein.
PETRO-11	158.00	Quartz biotite gneiss	PETRO-31	137.00	Biotite quartz gneiss.
PETRO-12	167.80	Quartz biotite gneiss	PETRO-32	148.80	Biotite quartz gneiss
PETRO-13	173.60	Quartz biotite gneiss	PETRO-33	168.10	Biotite mylonite
PETRO-14	189.00	Quartz biotite gneiss	PETRO-34	265.10	Biotite quartz gneiss

Характерные значения плотности и восприимчивости двух районов сильно различаются. Медный район Риачо-ду-Понтал отличается довольно стандартной плотностью пород со значениями от 2,6 до 3,1 г/см<sup>3</sup>. Для всех образцов горных пород магнитная восприимчивость пропорциональна плотности, но с двумя группами пропорциональности. Первая группа лишь умеренно пропорциональна, ее чувствительность варьируется от 0 до 1,8 · 10<sup>-3</sup> SI, а вторая группа очень пропорциональна, ее чувствительность варьируется от 0 до 13 · 10<sup>-3</sup> SI. Во второй группе гидротермальный процесс был ответственен за увеличение содержания магнетита. Медный район Вале-ду-Кюрасас отличается гораздо более высокой плотностью - от 3,5 до 4,4 г/см<sup>3</sup>, с гораздо более высокими пропорционально изменяющимися значениями восприимчивости - от 0 до 800 · 10<sup>-3</sup> СИ. Плотность залежей меди в районе Вале-ду-Кюрасас типична для основных и ультрамафитовых пород. В этом районе метаморфизм наложил отпечаток на ультраосновные породы, превратив их в гранулиты. Гидротермальный процесс

ЮСГ в зонах сдвига увеличивает намагниченность за счет отложения магнетита в жилах, связанных с медной минерализацией.

Были собраны данные сейсмической томографии. На томографическом изображении показана скорость S-образной волны ( $V_s$ ) в провинции Каракас ЮСГ, рудных районах Риачо-ду-Понтал и Вале-ду-Кюрасас. Данные были использованы для определения сейсмических свойств, связанных с литосферой, подстилающей основные провинции ЮСГ в Бразилии (рис. 8).

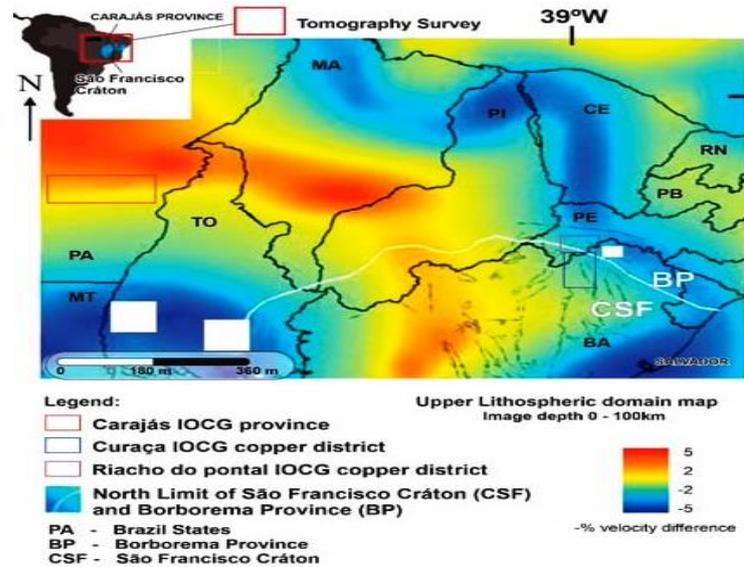


Рис. 8. Томографический срез глубиной 0-100 км.

Красно-оранжевые цвета обозначают высокие скорости S-волны ( $V_s$ ), а сине-зеленые - низкие значения  $V_s$ .

Данные представляют собой модель средних сейсмических скоростей на глубине 0-100 км. Область с высокой скоростью предположительно указывает на кратоническую область, а область с меньшей скоростью - на границу кратона.

#### 4. 3D модели магнитной и гравитационной инверсии.

Моделирование MVI стало важным поисковым методом. VOXI Earth Modeling - это облачный и кластеризованный вычислительный пакет Oasis Montaj, позволяющий преобразовывать геофизические данные в 3D. В нем используется декартова ячейка разреза (ССС), а алгоритм был упрощен для более точного представления геологических поверхностей.

Магнитные и гравитационные данные были инвертированы для создания 3D-моделей магнитной восприимчивости и плотности двух рудных районов. Эти модели были интегрированы с другими данными с использованием многоядерной облачной вычислительной платформы.

### *3D магнитная инверсия.*

Сетка данных о магнитных аномалиях суммарного поля была инвертирована для создания трехмерной модели магнитной восприимчивости с использованием метода MVI с использованием программного обеспечения пакета Geosoft Oasis. Метод MVI является особенно эффективной методикой инверсии для использования в районах с низкой геомагнитной широтой и в геологических условиях, где мало что известно об остаточной намагниченности исследуемых пород (палеомагнитные исследования пород в пределах этих районов не проводились). Метод предполагает, что наблюдаемый на поверхности магнитный сигнал связан как с изменяющимися контрастами восприимчивости, так и с изменяющимся направлением намагниченности магнитного поля, что позволяет проверить наличие остаточных свойств.

Воксели для магнитной инверсии были установлены равными 250м(х)×200м(у)×250м(з). Исходные данные модели включали петрофизические свойства, геологию поверхности и структурную информацию в качестве качественных ограничений.

### *3D-инверсия плотности.*

VOXI MVI modeling - это облачный и кластеризованный вычислительный модуль Geosoft Oasis Montaj, используемый для инверсии данных о силе тяжести. Пакет Geosoft использует декартову ячейку разреза (ССС) и итеративный алгоритм инверсии повторного взвешивания. Для гравитационных моделей использовались воксели размером 250×250×250 м.

В модели использовался рельеф для представления верхней части модели и глубина 5000 м для ограничения нижней поверхности модели. Размер ячейки Z-вокселя находится в логарифмической прогрессии с глубиной. Допустимый уровень абсолютной погрешности для всех моделей был установлен на уровне 0,02 мГал. Фон линейного тренда был удален из входной гравитационной сетки, чтобы упростить процесс моделирования и избежать получения ошибочных результатов и нежелательных краевых эффектов. Было использовано гравитационное поле Буге вместо изостатических аномалий (в определенных инверсионных областях рельеф плоский).

## **5. Результаты.**

### ***5.1. Гравитационные и магнитные характеристики.***

#### *Район Вале-ду-Кюрасас.*

Гравитационные аномалии над рудным районом (рис. 6б) показывают, что вмещающие гнейсы и др. обладают высокой плотностью в среднем - 2,78, 3,1 и 3,3 г/см<sup>3</sup>, а в пределах

месторождений - от 3,5 до 4,35 г/см<sup>3</sup> (руда включает минералы с высокой плотностью - халькопирит, магнетит и борнит, связанные с роговой обманкой, биотитом, апатитом и цирконом).

Район расположен в пределах магнитного максимума, сопровождаемого удлиненными минимумами, которые фиксируют основные сдвиговые структуры. Минерализация меди в районе связана с линейными магнитными аномалиями NS-тренда

от 26 до 100 нТл. Магнитная восприимчивость колеблется от 100 до  $800 \times 10^3$ . Магнитная восприимчивость рудных зон района Вале-ду-Кюрасас в десять раз выше, чем в районе Риачо-ду-Понтал (рис. 7а,б).

#### *Район Риачо-ду-Понтал.*

Район Риачо-ду-Понтал расположен на градиенте силы тяжести (рис. 6б), который геологически соответствует зоне коллизионного шва, между кратоническим блоком с более высокой плотностью и корой с более низкой плотностью, подвижного пояса Риачо-ду-Понтал. В этой зоне были нанесены на карту офиолитовые тела. Месторождения меди расположены на границе гравитационного градиента, где породы, подвергшиеся сильным изменениям, имеют плотность, которая перекрывается с плотностями менее измененных пород и колеблется от 2,75 до 3,1 г/см<sup>3</sup> (рис. 7б). Область гравитационного градиента включает породы, богатые биотитом и гранатом, которые залегают вдоль зон сдвига и содержат рудные залежи.

В районе оруденение не связано с сильными магнитными аномалиями. Оно проявлено в немагнитных гнейсах, имеющих диапазон магнитной восприимчивости от  $0,2 \times 10^{-3}$  SI и в основном расположено в зонах со слабыми магнитными аномалиями (ТМІ) или без них с интенсивностью ниже 40 нТл (рис. 5).

### **5.2. 3D инверсионные модели.**

#### *Район Вале-ду-Кюрасас.*

Трехмерная модель магнитной восприимчивости медного выявляет магнитные особенности, соответствующие многочисленным геологическим структурам, которые отражают эпизодическую тектоническую активность. Трехмерная интерпретация была построена с использованием полевых геологических и структурных данных (рис. 9)

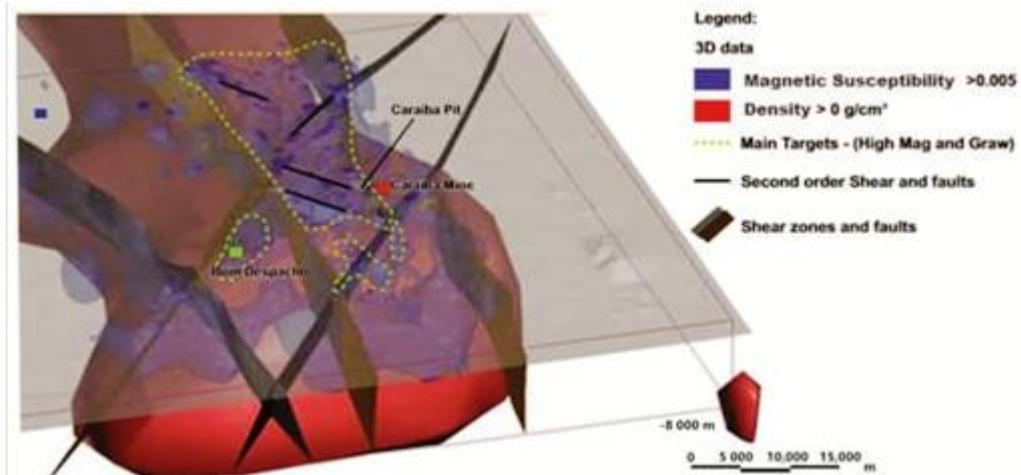


Рис. 9. Инверсия магнитного поля MVI (SI > 0,005) и контраста плотности (> 0 г/см<sup>3</sup>) рудного района.

Перевернутая модель представлена контуром тела с высокой магнитной восприимчивостью и высокой плотностью контраста. Был выбран дискриминантный уровень, который позволяет представить повышенную плотность и намагниченность через положительные значения контраста плотности (>0 г/см<sup>3</sup>) и значения чувствительности выше 0,005 СИ. В 3D-рендеринге модель этих относительно высоких значений проиллюстрирована на рисунке 9, где указаны известные сдвиговые нарушения и местоположение месторождения Караиба, ниже которого обнаружено характерное крупномасштабное уплотнение и повышенная восприимчивость, что и контролирует минерализацию ЮСГ. Желтая пунктирная область на рисунке 9 обозначает основную поисковую цель с высоким потенциалом размещения новых рудных тел ЮСГ

В трехмерной тектонической обстановке месторождение неразрывно связано с высокой магнитной восприимчивостью и с положительной аномалией плотности (рис. 10).

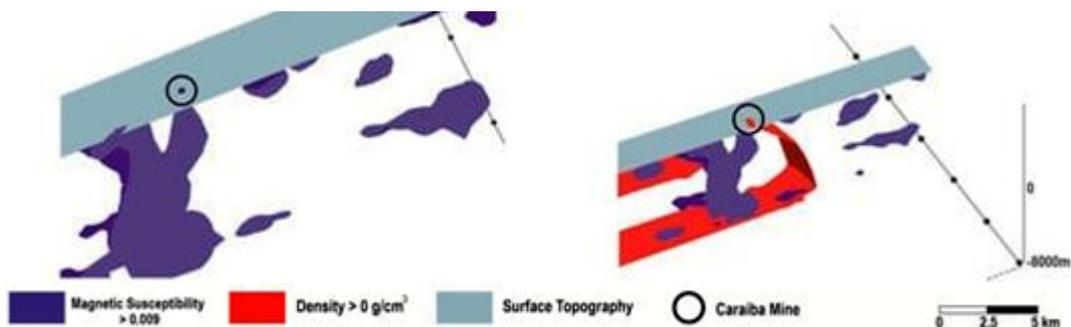


Рис. 10. Трехмерная модель магнитной восприимчивости (в единицах > 0,009 СИ) и инверсии гравиметрической плотности (> 0 г/см<sup>3</sup>), интегрированной для м-ния Караиба.

Глубина модели до 8000 м. Синее - относительно высокая восприимчивость со значениями, превышающими 0,009 СИ, синее и красное - суперпозиция восприимчивости и положительного контраста плотности, серое - абсолютно плоский рельеф. Оруденение тесно связано с аномалиями восприимчивости и плотности вдоль ловушек сдвига.

На рисунке 11 показаны результаты гравиметрических и магнитных инверсий вдоль профиля EW м-ния Караиба.

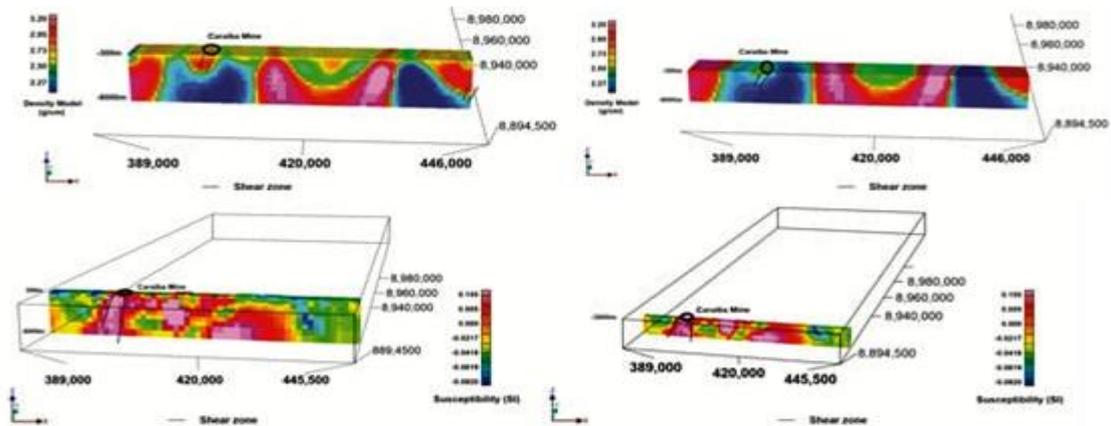


Рис. 11. Профили плотности и магнитной восприимчивости EW на глубине от 300 до 3000 м.

Области с высокой магнитностью ( $>0,005$  SI) и плотностью ( $>3,20$  г/см<sup>3</sup>) связаны со свойствами горных пород на различных глубинах. В тех же профилях, на глубине 3000 м, аномалии намагниченности демонстрируют непрерывность вплоть до более глубоких зон (-8000 м), в случае аномалий плотности, в более глубоких зонах (-3000 м) аномалии не демонстрируют непрерывности: геологически это интерпретируется как графитированные породы, которые возникают на меньших глубинах, и, вероятно, метаосадочные породы на больших глубинах. Было обнаружено, что зоны гидротермальных изменений связаны с магнитными зонами в зонах сдвигов, что открывает возможность развития минерализации с глубиной.

На рисунке 12 показана интегрированная модель с гравиметрическими значениями Буге, наложенными на перевернутую магнитную модель и модель плотности.

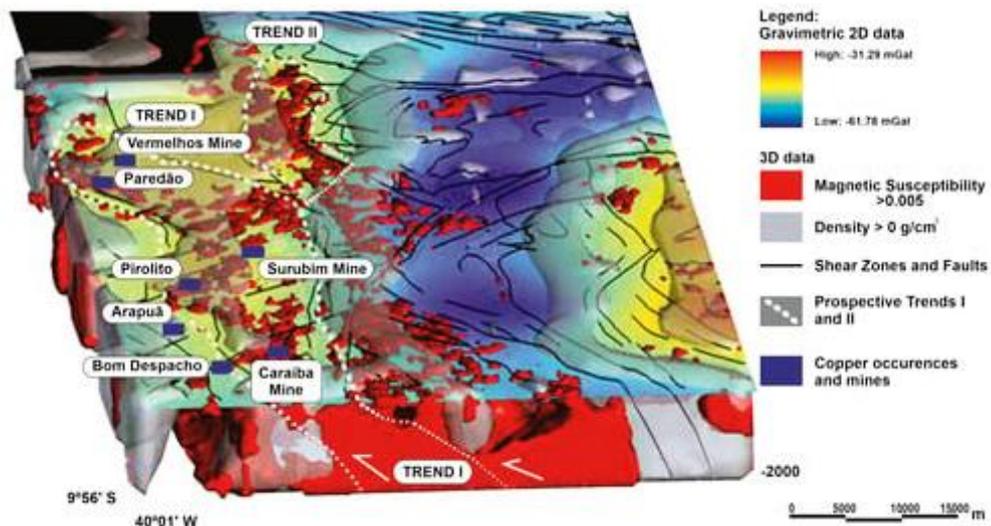


Рис. 12. Минеральная система IOCG в региональном разрезе. Основные перспективные тренды расположены в зоне контакта между доменами с высокой магнитной восприимчивостью ( $> 0,005$  SI) и плотностью ( $>0$  г / см<sup>3</sup>).

На 3D-изображении красным обозначены области повышенной магнитной восприимчивости, серым - с положительным контрастом плотности. Можно видеть, что месторождения меди в основном связаны с повышенной восприимчивостью и повышенными значениями плотности. Фактически, они расположены вдоль тренда I - структуры, высокой плотности и восприимчивости. На северо-востоке эти условия схожи, но не исследованы.

Трехмерные магнитные и гравитационные инверсии показывают две основные перспективные тенденции, обе имеют форму сигмоидального сдвига. Эти тренды расположены в зоне контакта областей с высокой магнитной (восприимчивость  $>0,005$  SI) и аномальной плотностью ( $>0$  г/см<sup>3</sup>), связанной с содержанием магнетита и т.п.

Гидротермально-метасоматические изменения и связанная с ними минерализация в районе связаны с магнитными и гравитационными аномалиями, сходными с другими районами IOCG в кратоне Голер, Австралия; Кируне, Швеция; и магматической зоне Грейт-Беар, Канада.

#### *Район Риачо-ду-Понтал.*

В районе залежи меди не связаны с очевидными положительными значениями плотности и магнитной восприимчивости. Это согласуется с тем фактом, что вмещающие породы показали характеристики без явных аномалий плотности и восприимчивости. Оруденение меди связано со сдвиговыми разломами, но не с повышенной плотностью и содержанием магнетита. Эти сдвиговые зоны сопровождаются дискретными линейными магнитными особенностями: низкими магнитными аномалиями вблизи поверхности и высокой магнитной сигнатурой ( $>0,005$  СИ) с увеличением глубин ( $>400$  м) (рис. 13).

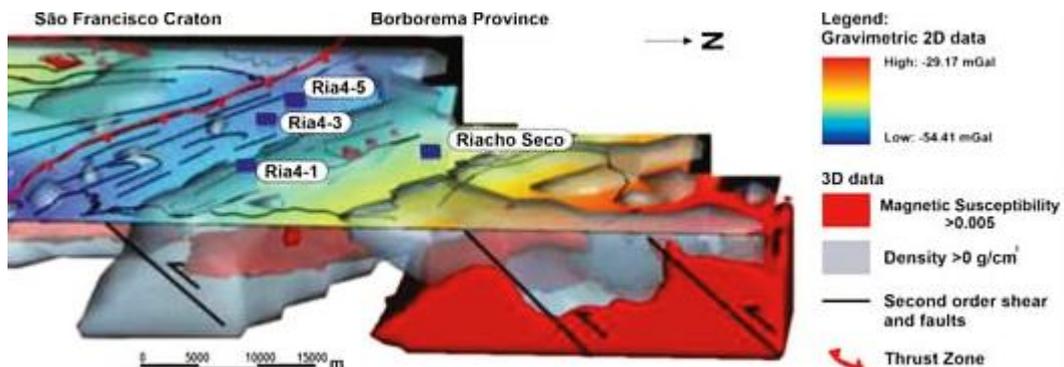


Рис. 13. Магнитно-гравиметрические инверсии MVI в районе Риачо-ду-Понтал. *Ria4-1, Ria4-3, Ria4-5 и Риачо-Секо являются основными месторождениями меди в районе.*

## 6. Минеральные системы рудных районов IOCG.

В региональном масштабе крупные литосферные структуры (ловушки минерализующих систем IOCG), контролирующие потоки рудоносных флюидов часто «видны» в гравитационных и магнитных данных - 3D инверсионных моделях.

В целом, сейсмотомографические изображения могут показывать границы кратонов. Эти граничные зоны благоприятны для рудоносных флюидов. Сохранившиеся кратонические регионы (SCLM) могут быть нанесены на карту как области с высокой сейсмической скоростью. Провинция ЮСГ Карахас и рудные районы Вале-ду-Кюрасас и Риачо-ду-Понтал расположены в переходной зоне между областями высоких и низких скоростей (рис. 4) и могут отражать рефertilизацию SCLM. Месторождения ЮСГ, расположены вдоль кратонических краев. В этом контексте следует более подробно оценить обширные градиенты, обрамляющие зону высоких скоростей по обе стороны от восточно-центральной Бразилии.

Края кратонов характеризуются истончением литосферы и представляют собой зоны сильной тектонизации, создающие участки растяжения или транспрессии вдоль транситосферных разломов. Эти крупные сдвиговые зоны часто используются для внедрения расплавов в земную кору. Например, районы ЮСГ в Австралии, включая м-ние мирового класса Олимпик Дам в кратоне Гоулер, связаны с наличием крупных магматических провинций, которые могут содержать значительное количество интрузивных кислых пород. В рудных районах Риачо-ду-Понтал и Вале-ду-Кюрасас структурные интерпретации показывают, что региональная зона первичного надвига неоднократно активизировалась с образованием многочисленных сдвиговых зон.

Сигмоидальные или “SC-образные” структуры указывают на основные системы сдвига. Фрактальные структуры, имитирующие структуры типа “SC”, систематически повторяются на макро- и микромасштабах. Эти структуры служат критическими путями для восходящего потока флюидов, способствуя взаимодействию между флюидом и породой. Дуплексные, полосовые и асимметричные структуры довольно распространены вдоль системы сдвига. Наиболее важные ловушки для вмещающих рудных тел включают (а) зоны соединения структур типа “SC”; (б) фрактальные структуры типа “С” второго или третьего порядка; (в) изгибы вдоль зон сдвига как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, где обычно залегает высококачественная брекчия; (г) пересечения разломов, весьма благоприятные для вмещающих брекчиевых руд; и (д) зоны пластичного сдвига, активизированные позднехрупкими разломами, которые обогащают рудные отложения.

Часто литологические границы между подразделениями с разной компетенцией имеют решающее значение для размещения коридоров высоких деформаций. Таким образом, зоны контакта с подходящими породами, такими как парагнейсы, гранулиты, гранулитовые ортогнейсы и формации полосчатого железа (BIFs), обычно захватываются для просачивания гидротермальных флюидов, связанных с зонами сдвига. В районе Вале-ду-Кюрасас, учитывая

только эпигенетический процесс минерализации IOCG, вмещающими породами являются преимущественно кислые гранулитовые породы.

Рудные тела часто принимают сигмоидальную форму, поскольку они часто располагаются в зонах сдвига. Часто вдоль гидротермальных систем IOCG обнаруживаются зоны трубчатых брекчий раннего, син- и позднектонического типа. Изменение направления и понижение вдоль зон сдвига, как по горизонтали, так и по вертикали, действует как структурная ловушка как для гидротермальных, так и для трубчатых брекчий. Как правило, богатые брекчийей руды расположены в центральной зоне гидротермальной системы.

Гидротермальные изменения характеризуются ранним высокотемпературным превращением Na (альбита) (500-700°C; в низкотемпературное превращение K-Fe (<350 °C). Высокотемпературное изменение альбита может быть связано с магма-гидротермальными системами. Железо хорошо растворимо при высоких температурах и в солевых жидкостях и усиливается за счет увеличения  $H^+$  в системе жидкостей, что приводит к более интенсивным потокам железа.

В районах Риачо-ду-Понтал и Вале-ду-Кюрасас гидротермальные изменения связаны с флюидами средней и высокой температуры. Гало изменений простирается от 1 до 5 км в ширину, следуя за основными зонами сдвига. Содовое изменение более дистальное и калиевое, а кальциевое и железистое изменения более проксимальные в обоих районах. Южные месторождения Суссуарана, Карайба и Сурубим связаны с более глубокими и высокотемпературными натриево-калиевыми гидротермальными изменениями в отличие от месторождения Вермелью, в котором гидrolитические изменения происходили в более мелких зонах гидротермальной системы IOCG. Как правило, серия магнитных диполей связана с зонами сдвига и гидротермальными ореолами.

Общая схема гидротермального районирования месторождений IOCG обычно вертикальная - от преобладающего магнетита на глубине до преобладающего гематита на более мелких уровнях. Используя эту модель, можно интерпретировать район Риачо-ду-Понтал как расположенный в самой мелководной части системы IOCG (рис. 14).

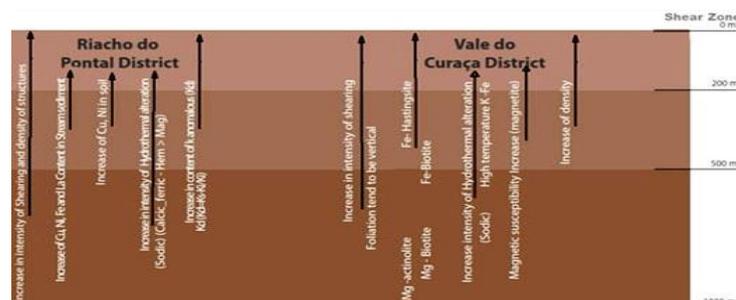


Рис. 14. Основные геологические, геохимические, структурные и геофизические векторы, иллюстрирующие рудные районы Вале-ду-Кюрасас и Риачо-ду-Понтал.

Таким образом, необходимо выполнить дополнительную работу по выявлению более глубоких (или более эродированных) участков системы ЮСГ, связанных с большим количеством магнитных и плотностных объектов.

### **7. Поисковый потенциал рудных районов.**

С помощью 2D- и 3D-картографирования можно проверить изменение этих параметров в зависимости от расстояния до месторождений или проявлений. Увеличение или уменьшение интенсивности этих процессов отражает векторы, ведущие к изученным системам ЮСГ (рис. 14).

#### *Район Риачо-ду-Понтал:*

(a) Структура: увеличение интенсивности сдвига и плотности структур в направлении вторичных структур. Слоистость имеет тенденцию быть вертикальной. Независимо от структурного режима, большинство месторождений в обоих районах контролируются изгибами вмещающих пород.

(b) Речные отложения и почва: аномалии содержания Cu, Ni, Fe и La в речных отложениях и Cu (Ni, Ce и La) в почве.

(c) Низкие магнитные аномалии, связанные с Kd (Kd-аномальный калий) и зонами сдвига.

(d) Низкие магнитные аномалии (обилие гематита, связанное с рудными зонами).

#### *Район Вале-ду-Кюрасас:*

(a) Связь на региональном уровне с высокими гравиметрическими и магнитными аномалиями.

(b) Исследуемая нами территория находится внутри области с относительно высокой скоростью, ограниченной на востоке областью с низкой скоростью. Область с высокой скоростью предположительно указывает на кратоническую область, а область с меньшей скоростью - на границу кратона.

(c) Месторождения тесно связаны с магнитными и гравиметрическими тенденциями NS, которые интерпретируются как имеющие чувствительность  $>0,09 SI$  и плотность  $>0g/cm^3$ .

(d) Гидротермальные изменения: увеличение аномалий связано с гидротермальными процессами: (1) дистальные изменения содержания натрия и (2) минерализованная зона, в значительной степени связанная с изменением содержания железа и кальция. Увеличение содержания Fe-актинолита FeO<sub>t</sub>/и Fe-биотита в направлении более гидротермализованных измененных зон.

Тем не менее, в районе Вале-ду-Кюрасас сохраняется нетипичная парадигма: выбор новых объектов не обязательно проводится в ультраосновных породах. Система IOCG может развиваться в любой вмещающей породе на различной глубине.

## **8. Выводы.**

1. Изучение особенностей месторождений IOCG в Бразилии показывает, что эти месторождения могут находиться в любом типе горных пород с определенными типами гидротермальных изменений и на разных глубинах. Трехмерное геологическое моделирование в сочетании с геофизической и структурной интерпретацией может облегчить пространственное и временное понимание гидротермальных систем районов Вале-ду-Кюрасас и Риачо-ду-Понтал.

2. Рудные районы Вале-ду-Кюрасас и Риачо-ду-Понтал расположены в различных геологических и тектонических условиях, и более раннее событие минерализации IOCG, произошедшее в пределах кратона Сан-Франциско, связано с гидротермальными процессами палеопротерозоя (около 2-2,2 млрд лет назад). В подвижном поясе Бразилии обнаружена более молодая фаза минерализации IOCG в неопротерозое (около 750-570 млн лет назад).

3. Оба района IOCG развивались в тектонической обстановке дуги, перекрытой сдвиговыми зонами.

4. Интерпретация гравиметрических и магнитных данных показывает различные магнитные и гравиметрические характеристики для этих двух рудных районов:

Район Вале-ду-Кюрасас находится в зоне высокой региональной гравиметрической активности. Он имеет 110 км в длину и 22 км в ширину и демонстрирует сильную взаимосвязь с магнитными и гравиметрическими аномалиями

Региональная гравиметрическая сигнатура района Риачо-ду-Понтал в основном связана с отрицательной аномалией Буге NW–SE. Эта отрицательная аномалия представляет собой коллизионный шов между кратонным блоком и подвижным поясом Риачо-ду-Понтал. Залежи IOCG района находятся в областях с низкой гравиметрической подписью. Породы имеют плотность 2,7–2,78 г/см<sup>3</sup>, а наиболее сильно измененные породы имеют плотность 2,75–3,1 г/см<sup>3</sup>.

5. Магнитные сигнатуры довольно отчетливы. Рудные коридоры в районе Вале-ду-Кюрасас связаны с магнитными аномалиями, расположенными в западной части орогена. С другой стороны, месторождения меди, расположенные в поясе района Риачо-ду-Понтал, расположены в зонах с очень слабыми магнитными аномалиями или без них.

6. MVI показывает две основные перспективные тенденции северо-запада в районе Вале-ду-Кюрасас: тенденции I и II имеют форму сигмоидального сдвига. Эти тренды расположены в зоне контакта между доменами с высокой намагниченностью (восприимчивость  $>0,005$  SI) и аномалиями плотности ( $>0$  г/см<sup>3</sup>) и демонстрируют контраст по плотности и содержанию магнетита. Trend I имеет 40 км в длину и 10 км в ширину. Здесь расположены м-ния Карамба, Сурубим, Вермельо и др., и это наиболее важная тенденция размещения месторождений IOCG в районе.

7. Общая схема гидротермального районирования месторождений IOCG в основном вертикальная - от магнетитового с преобладанием на глубине до гематитового с преобладанием на верхних уровнях. Неопротерозойский рудный район Риачо-ду-Понтал можно интерпретировать как расположенный в самой «мелководной» части системы IOCG. Необходимо выполнить дополнительную работу по поиску более глубоких (или более эродированных) участков системы IOCG, связанных с более магнитными и плотными участками (цели в северной части района).

8. Обширные территории, расположенные по бокам от изображения высокоскоростной сейсмической томографии, которые уже контролируют в широком масштабе провинцию Карахас IOCG и рудные районы Риачо-ду-Понтал и Вале-ду-Кюрасас в Бразилии, должны быть оценены более подробно в рамках дальнейших поисковых программ.

## **Б. ПОИСКОВЫЕ, ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫЕ И ДОБЫЧНЫЕ РАБОТЫ**

### **VI. ПОСТРОЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ 3D-МОДЕЛИ РУДНОГО ТЕЛА НА ОСНОВЕ РЕКОНСТРУКЦИИ И ДЕФОРМАЦИИ СЕТКИ [8].**

#### **1. Введение.**

Модели рудных тел необходимо регулярно перестраивать для повышения качества моделирования и оптимизации дальнейших поисково-разведочных и добычных работ.

Однако из-за сложности и неопределенности 3D-геологического моделирования часто бывает трудно выполнить необходимую оценку запасов ресурсов, что сильно влияет на эффективность освоения объекта. Таким образом, динамическое обновление геологических моделей стало важным узким местом в поисково-разведочных и добычных работах.

Обновление геологических моделей включает как «глобальное» так и локальное обновление. Для глобального обновления моделей хорошим методом является реконструкция модели на основе неявного моделирования. Это идеальный метод для построения интерактивных ограничений и моделей динамического обновления. Для этого метода геометрическое поле, построенное по данным разреза, преобразуется в поле расстояний с помощью функции расстояния. Математические функции могут быть использованы для представления 3D-модели поверхности, которая может быть преобразована в сетчатую модель. Для геологических моделей, если существуют неявные модели и линии ограничений, линии ограничений могут использоваться в качестве условий пространственной интерполяции, а метод неявного моделирования может использоваться непосредственно для динамического обновления. Однако геологическая модель, подлежащая обновлению, может быть построена различными методами. Для явной модели, построенной методом сращивания контуров, сложно обновить модель, используя недавно интерпретированные полилинии контура.

Для локального обновления геологической модели может быть осуществимым метод интерактивной деформации сетки. Во-первых, метод требует спецификации вершин сетки интересующей области (т.е. области деформации) на поверхности обновляемых моделей сетки, включая точки ограничения и точки, не являющиеся точками ограничения. Во-вторых, для каждой точки ограничения должно быть указано целевое положение обновления, и условия деформации ограничения должны быть определены в целевом положении каждой точки ограничения. В процессе деформации координаты неограниченных точек обновляются с помощью алгоритмов деформации, таких как алгоритм деформации Лапласа. Наконец, обновленная модель генерируется за счет ограниченной деформации интересующей области

сетки поверхности модели. Обновление геологических моделей основано на обновленной информации геологической интерпретации. Он включает в себя проблему соответствия между точками отбора проб на линии геологической интерпретации и точками ограничения деформации модели. Процесс сопоставления должен обеспечивать соответствующую взаимосвязь между точками геологической интерпретации и целевым положением обновления точек ограничения деформации.

Для решения вышеуказанных проблем ориентируются на метод локального обновления 3D-моделей рудных тел на основе данных геологической интерпретации реального мира. На основе реконструкции и деформации сетки рассматривается процесс локального обновления моделей рудных тел как процесс локальной ограниченной деформации сетчатых моделей. Таким образом, предлагается метод локального динамического обновления моделей рудных тел на основе реконструкции и деформации сетки, и реализуется алгоритм ограниченной деформации сетки моделей рудных тел. Этот метод может автоматически обновлять данную 3D-модель рудного тела на основе набора неупорядоченных линий геологической интерпретации. Он позволяет эффективно решать проблему постепенного и быстрого обновления моделей рудных тел в процессе разведки и добычи, что имеет широкую перспективу популяризации и применения в геологическом моделировании.

## **2. Моделирование геологических тел.**

Ниже кратко представлены три основных достижения в моделировании, а именно: моделирование поверхности геологических тел, обновление модели геологических тел и ограничительная деформация сетчатых моделей.

### *Поверхностное моделирование геологических тел.*

Основным объектом моделирования поверхности является структурная модель, которая выражает граничную геометрическую информацию. В соответствии с процессом моделирования и математическими характеристиками модели методы моделирования рудного тела можно разделить на явное и неявное моделирование. Метод неявного моделирования, основанный на неявной функции, может автоматически интерполировать данные пространственной выборки, точно строить неявную поверхность в соответствии с данными выборки, значительно сокращать ручное взаимодействие и улучшать автоматизацию моделирования. Этот метод назвали «методом беспроводного кадрового моделирования» и сравнили его с методом явного моделирования. Также был предложен метод моделирования явной и неявной интеграции, который обеспечивает эталон для решения геометрического объединения различных типов моделей сложной геологической

структуры. В последние годы метод неявного моделирования привлек внимание и получил развитие в области 3D-моделирования поисково-разведочных и добычных работ из-за его преимуществ в динамическом обновлении. Например, функции поля расстояний со знаком, радиальные базисные функции (RBF), ограничения интерполяции по геологическим правилам, методы линейной интерполяции, методы неявной реконструкции поверхности и т.д., были применены к моделированию рудного тела. Кроме того, также разрабатываются специальные методы неявного моделирования на основе различных геологических данных: бурения, геологических разрезов, данных облака точек и т.д. Однако большинство основных программ для моделирования по-прежнему используют традиционный метод явного моделирования, и весь процесс моделирования требует множества ручных взаимодействий. Ограничения традиционного метода постепенно становятся заметными для рудных тел со многими разрезами и сложными формами, такие как низкая эффективность и сложность динамического обновления. Поэтому в данном материале реконструируется исходная модель рудного тела с сохранением признаков, используя метод неявного моделирования, который может продемонстрировать свои преимущества с точки зрения времени моделирования и качества модели.

#### *Обновление модели геологических тел.*

Метод обновления геологических моделей можно разделить на глобальное обновление и локальное обновление в зависимости от объема обновления. Метод глобального обновления - это, по сути, процесс реконструкции модели. Если данные моделирования изменяются локально, все явные и неявные модели могут быть обновлены путем реконструкции. Метод явного моделирования требует интерпретации данных, определения профилей и повторного соединения контурных полилиний, что включает сложный процесс обновления модели, состоящий из множества этапов. Однако метод неявного моделирования может автоматически реконструировать модель только путем ввода новых данных, а качество модели и эффективность моделирования выше, чем при явном моделировании. Например, был разработан прототип системы, которая может импортировать линии разреза из базы данных или рисовать линии разреза в интерактивном режиме, а также обновляет модель сразу после добавления новых ограничений. Был предложен новый метод интерполяции обобщенной радиальной базисной функции (GRBF), основанный на интерполяции GRBF и различных типах ограничений, который может восстанавливать неявные поверхности из набора облаков точек и нормальных данных. Что касается локального обновления, то его можно рассматривать как процесс корректировки модели в локальном регионе, который в основном включает технологию пространственной деформации сетки. С одной стороны, для

локального обновления сетки могут быть рассмотрены неявные и математические методы, такие как методы локальной деформации сетки, основанные на трехгармоническом RBF, и локальный RBF с компактной поддержкой. В настоящее время применение этих методов в геомоделировании все еще нуждается в дальнейшем изучении и совершенствовании. С другой стороны, как явные, так и неявные модели являются явными полигональными сетчатыми моделями в визуальных условиях. Поэтому рассматривается возможность реализации локального обновления моделей рудного тела с использованием метода интерактивной деформации сетки, в основном включающего построение ограничивающих условий деформации, алгоритм деформации сетки и т.д. Метод может обновлять сетчатую модель, полученную любым методом моделирования, и имеет более широкую сферу применения.

#### *Ограниченная деформация сетчатых моделей.*

Основанный на теории интерактивной деформации сетки, подход ограниченной деформации включает ввод сетчатой модели рудного тела и нескольких управляющих полилиний, а также построение условий ограниченной деформации для реализации локальной деформации сетки и обновления модели рудного тела.

На протяжении многих лет проводились соответствующие исследования по интерактивной деформации и оптимизации сетки в областях медицины, механики, графики и т.д., например, метод деформации сетки на основе примеров и пространственного представления структуры реконструкции, инвариантной к вращению, для точного восстановления положений вершин (представление объектов допускало интерполяцию и экстраполяцию). Чтобы реализовать локальный контроль деформации сетки, использовали дифференциальные координаты для описания локальных характеристик геометрических моделей и вставили элементы формы в сетки. Несмотря на то, что в интерактивной деформации сетки было проделано много, манипулировать геометрически сложными сетками и генерировать результаты реальной деформации по-прежнему сложно. В настоящее время деформация Лапласа является лучшей с точки зрения времени расчета и качества сетки. Например, алгоритм реконструкции костного шаблона на основе деформации поверхности Лапласа, может быть использован для 3D-моделирования ортопедических рентгеновских изображений. Регистрации набора точек в виде смешанной модели Лапласа (LMM), может быть использована для решения нежесткой задачи регистрации набора точек с ограничивающими условиями (например, расстоянием, преобразованием и соответствием).

Для сетчатых моделей деформации рудного тела рассматривается построение каркаса ограниченной деформации в сочетании с теорией деформации Лапласа для реализации

локальной поверхностной деформации в необязательной области сетки. Результат деформации не оказывает глобального деформационного эффекта на всю модель.

### 3. Методология.

Необходимо динамически обновлять модель рудного тела в соответствии с последними данными каротажа с непрерывным отображением местных геологических характеристик рудного тела в процессе разведки и добычи. Была сделана попытка построить метод локального динамического обновления модели рудного тела на основе реконструкции и деформации сетки. Он создает условия ограничения деформации между моделью и данными каротажа.

Полилинии геологической интерпретации и точки интерпретации, полученные из данных каротажа, были основными источниками данных обновления модели. Они были преобразованы в контрольные полилинии и контрольные точки посредством предварительной обработки, которые использовались для представления полилиний и точек управления тенденцией внешней формы при обновлении модели, соответственно. Кроме того, точки деформации использовались для представления точки ограничения деформации на исходной модели рудного тела, соответствующей контрольным точкам. Область окрестности деформации использовалась для представления диапазона деформации сетки, на который влияют точки деформации на модели рудного тела, то есть области интереса (ROI).

В соответствии с идеей обновления 3D-реконструкции сетки рудного тела и деформации сетки, как показано на рисунке 1, метод обновления модели был разделен на пять основных этапов:

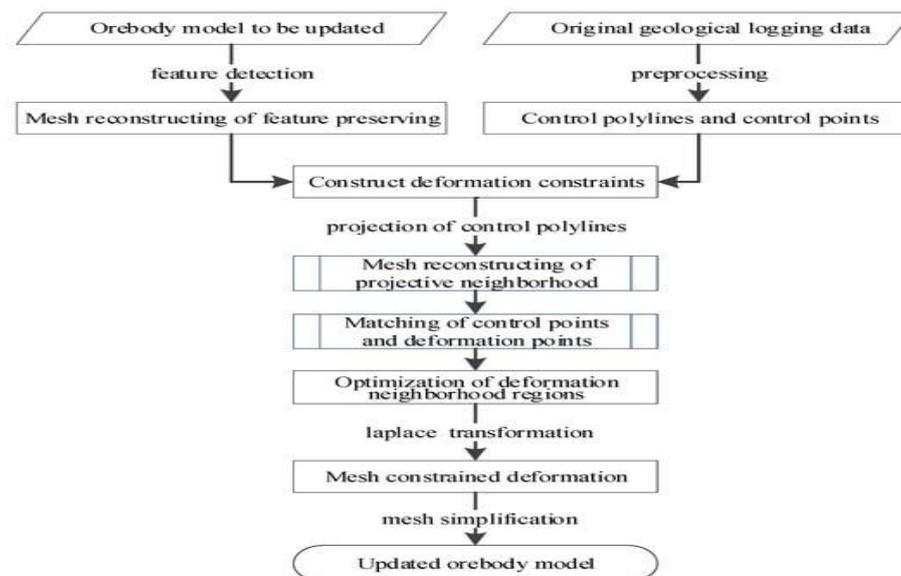


Рис. 1. Метод локального динамического обновления модели рудного тела на основе реконструкции и деформации сетки.

Шаг 1 (*предварительная обработка геологических данных*): Недавно полученные данные каротажа были преобразованы в контрольные полилинии и контрольные точки для получения информации о геометрических ограничениях с согласованной топологией.

Шаг 2 (*реконструкция сетки с сохранением признаков*): На основе обнаружения признаков исходная входная сетчатая модель была реконструирована с сохранением признаков, чтобы получить лучшую сетчатую модель с высоким качеством.

Шаг 3 (*построение ограничений деформации*): Ограничения деформации модели рудного тела были построены путем сопоставления точек деформации с помощью контрольных полилиний. Кроме того, аналогичный путь с таким же количеством точек был найден в сетчатой модели рудного тела на основе контрольных точек, выбранных на контрольных полилиниях.

Шаг 4 (*оптимизация обновления области окрестности деформации*): Область сетки, допускающая деформацию вблизи точек деформации, была оптимизирована и скорректирована в соответствии с расстоянием между моделью и контрольными полилиниями, морфологическими характеристиками модели, тенденцией локальной деформации и т.д.

Шаг 5 (*ограниченная деформация сетки*): В сочетании с преобразованием координат Лапласа и другими методами была получена локально обновленная модель рудного тела на основе оптимизированной области окрестности локальной обновленной деформации.

Наконец, были выполнены упрощение и исправление сетки обновленной модели рудного тела для получения действительной сетчатой модели, которая удовлетворяла различным характеристикам.

*(Далее, в разделе Результаты будут протестированы и проанализированы реальные данные; в разделе Обсуждения - проанализированы ограничения и расширения этого метода).*

#### *Предварительная обработка исходных геологических данных.*

Прежде чем локально обновлять модель рудного тела, сначала необходимо было предварительно обработать линии и точки геологической интерпретации, полученные из исходных данных каротажа, с уменьшением веса и упрощением для построения топологически согласованной информации о геометрических ограничениях. Во-вторых, все допустимые линии и точки геологической интерпретации необходимо было преобразовать в контрольные полилинии и контрольные точки соответственно, чтобы могли построить ограничения деформации на основе контрольных полилиний и контрольных точек на более позднем этапе.

Кроме того, было необходимо скорректировать положение пересечения контрольных полилиний, чтобы обеспечить точное пересечение каждой контрольной полилинии, чтобы обновленная модель рудного тела могла точно привязывать все контрольные полилинии. Кроме того, использовали метод пространственного поиска (например, ОБВ-дерево), чтобы ускорить вычисление точных точек пересечения всех контрольных полилиний.

На этапе построения деформационных ограничений была найдена оптимальная точка деформации, соответствующая контрольной точке, в соответствии с соответствующим направлением проекции. Чтобы эффект обновления модели соответствовал геологическим характеристикам, необходимо было корректировать направление проекции контрольных полилиний и точек относительно модели рудного тела.

#### *Реконструкция сетки геологических моделей.*

Чтобы гарантировать, что исходная входная модель рудного тела имела плавный тренд деформации и более высокое качество сетки, была важна реконструкция сетки для исходных геологических моделей. Необходимо было рассмотреть три основные проблемы, включая размер реконструкции сетки, защиту объектов и метод реконструкции.

Размер реконструкции представляет длину стороны грани реконструированной модели и соответствует длине стороны треугольного участка для модели с треугольной сеткой. В процессе реконструкции сетки лучше убедиться, что размер реконструкции меньше или равен интервалу контрольных точек, выбранных на контрольной ломаной линии. Восстановленный результат должен сохранять особенности исходной модели. Следовательно, было необходимо автоматически извлекать четкие элементы сетчатой модели с помощью алгоритма обнаружения объектов, включая характерные линии и характерные точки. Кроме того, были разрешены искусственные дополнительные характерные линии и точки для обеспечения качества геологических моделей после реконструкции сетки, такие как выравнивание края исходной модели и сохранение элемента складки между участками.

Был использован метод неявной реконструкции с учетом сохранения объектов. Он преобразовал характерные линии и характерные точки в ограничивающие линии и точки ограничения в качестве ограничений пространственной интерполяции и неявно выразил геометрическую модель рудного тела через неявную функцию. Наконец, неявная функция была преобразована в сетчатую модель методом реконструкции поверхности с учетом сохранения особенностей.

#### *Построение деформационных ограничений.*

Ограничения деформации являются предварительным условием и важным связующим звеном для обновления модели. Были построены ограничения деформации модели рудного

тела путем сопоставления точек деформации с контрольными полилиниями. Ключевая идея алгоритма заключалась в поиске аналогичного пути с тем же количеством точек, что и контрольная ломаная линия на сетчатой модели. Кроме того, было крайне важно, чтобы точки деформации на траектории были смежными, иначе в обновленной модели могли появиться дыры.

Для построения ограничений деформации, во-первых, нужно было выполнить поиск ближайших точек из всех контрольных точек, соответствующих поверхности модели, по точечной проекции. Затем проективная ломаная линия, соответствующая контрольной ломаной линии с таким же количеством точек, была определена путем принятия ближайшей точки за точку деформации. Точкой деформации должна была быть вершина сетки. Поскольку ближайшая точка проекции могла не быть вершиной сетки, проективную полилинию границы окрестности необходимо было дополнительно извлечь из треугольных участков, где были расположены точка деформации и проективная полилиния. Наконец, проективная окрестность была реконструирована путем использования точек деформации на проективной ломаной линии в качестве вершин сетки. Подробные этапы были следующими, а сам процесс и демонстрация показаны на рисунках 2 и 3 соответственно.

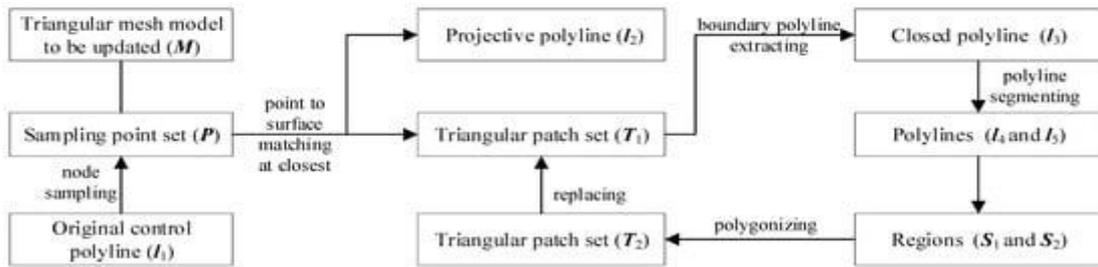


Рис. 2. Блок-схема реконструкции сетки проектной окрестности.

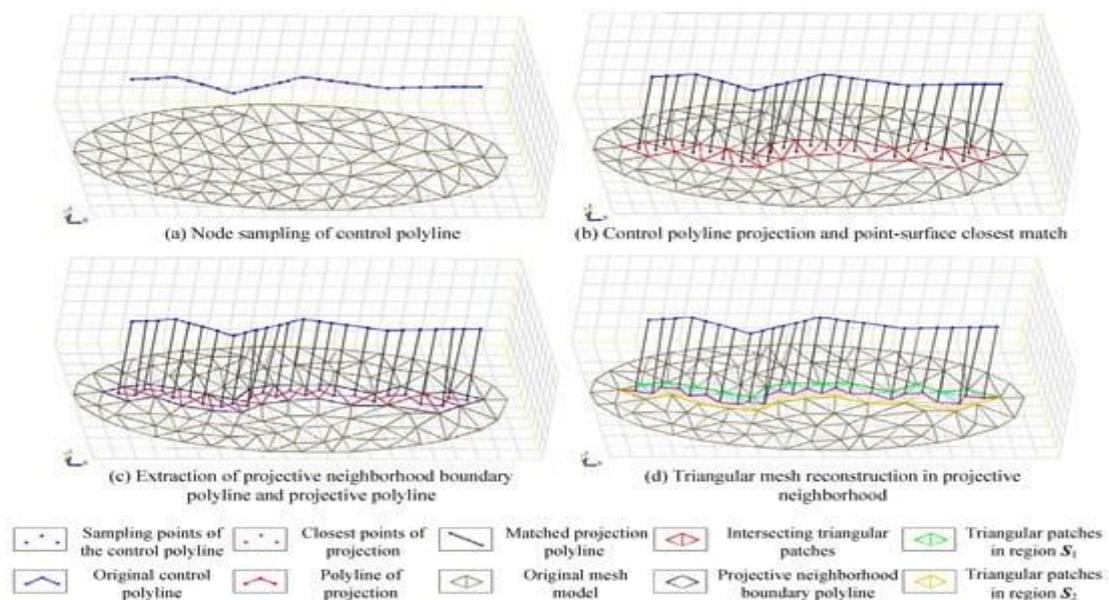


Рис. 3. Принципиальная схема реконструкции сетки в проектной окрестности.

Шаг 1: При условии резервирования всех ключевых узлов на контрольной полилинии, контрольная полилиния  $l_1$  отбирались пробы с определенным интервалом для получения набора точек отбора проб  $P$ .

Шаг 2: Обход набора точек отбора проб  $P$ , соответствующая проективная ломаная линия  $l_2$  была получена путем поиска ближайших точек отбора проб на сетке. Затем набор соединенных треугольных участков, обозначаемых как  $T_1$ , были получены, которые пересекались с проективной ломаной линией.

Шаг 3: Замкнутая ломаная линия  $l_3$  была получена путем выделения границы набора пересекающихся треугольных участков  $T_1$ .

Шаг 4: Ближайшие точки от начальной точки и конечной точки проективной ломаной линии  $l_2$  к замкнутой ломаной линии  $l_3$  соответственно, был произведен поиск. Затем две ближайшие точки были использованы для разделения замкнутой ломаной линии  $l_3$  на две полилинии ( $l_4$  и  $l_5$ ) соответственно.

Шаг 5: Регион  $S_1$  между  $l_2$  и  $l_4$  был полигонизирован. Затем регион  $S_2$  между  $l_2$  и  $l_5$  был полигонизирован для получения нового набора треугольных участков  $T_2$ , который заменил набор исходных треугольных участков  $T_1$ .

На шаге 2, в соответствии с положением ближайшей точки проекции (т. е. точки деформации) контрольной точки к модели треугольной сетки, ее можно разделить на три случая, а именно: вершину, ребро и участок треугольной сетки. Следовательно, для определения треугольных участков необходимо было использовать различные методы, как показано на рисунке 4. Во-первых, если точка деформации была расположена в вершине сетки, необходимо было добавить в набор смежные треугольные участки вершины сетки внутри круга  $T_1$ . Во-вторых, если точка деформации располагалась на краю сетки, к набору необходимо было добавить два соседних треугольных участка края сетки  $T_1$ . В-третьих, если точка деформации находилась в треугольном участке сетки, треугольный участок необходимо было добавить в набор  $T_1$ .

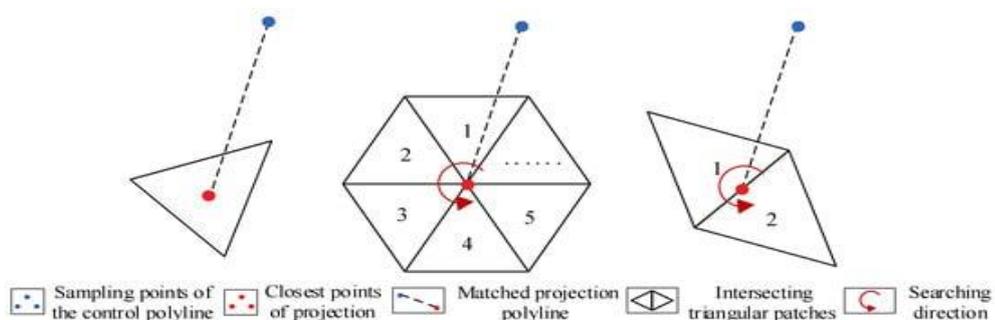


Рис. 4. Определение пересекающихся треугольных участков в соответствии с проекционным положением контрольных точек.

Треугольные участки, пересекаемые всеми согласованными проекционными полилиниями, могут быть найдены в соответствии с методом, показанным на рисунке 4. Однако для проведения последующей работы потребовался поиск всех треугольных участков на пути проективной ломаной. Кроме того, возникла проблема адаптации между контрольной ломаной и сеточной моделью. Если адаптивность была адекватной, контрольные точки могли соответствовать точкам деформации одна за другой, и топологическая структура треугольных сеток проективной окрестности была адекватной. Однако адаптивность была обобщена в некоторых условиях, таких как интервал выборки, превышающий размер сетки, локальная тенденция изменения формы модели сильно меняется и т.д. В данном случае топологический разрыв мог возникнуть в некоторых особых местах, для устранения которых требовались специальные методы. Таким образом, построили псевдонарезанную поверхность между двумя соседними точками деформации, которая была автоматически сгенерирована по трем точкам, включая две соседние точки деформации и среднюю точку двух соседних контрольных точек, как показано на рисунке 5. Затем поверхность псевдоразреза пересекалась с сетчатой моделью, и пересекающиеся треугольные участки были извлечены как подмножество  $T_1$ . Наконец, все треугольные участки между точками деформации могут быть извлечены для поддержания топологической непрерывности проективной окрестности.

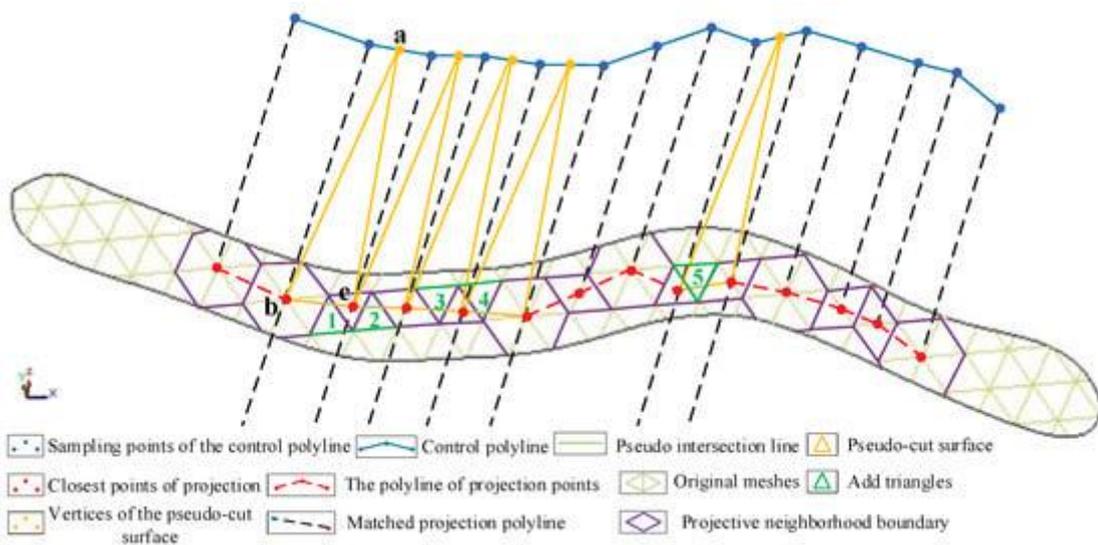


Рис. 5. Определение пересекающихся треугольных участков между точками деформации путем построения псевдонарезанных поверхностей. Вершины псевдонарезанной поверхности представлены 'a' to 'c'. Добавленные треугольные участки представлены '11' to '55'.

Следует отметить, что переплетение согласованных проекционных полилиний могло легко привести к самопересечению модели после деформации. В процессе сопоставления контрольных точек и точек деформации необходимо было обеспечить однозначное

соответствие между точками, чтобы избежать явления перекрестного сопоставления или повторного сопоставления.

*Определение и корректировка области окрестности деформации.*

Для определения области локального обновления окрестности деформации модели использовали метод построения области окрестности деформации на основе указанного радиуса кольца точки деформации. Для этого метода значение радиуса кольца использовалось для количественной оценки радиуса окрестности, а стратегия жадного поиска использовалась для автоматического поиска области окрестности деформации вокруг точки деформации, как показано на рисунке 6.

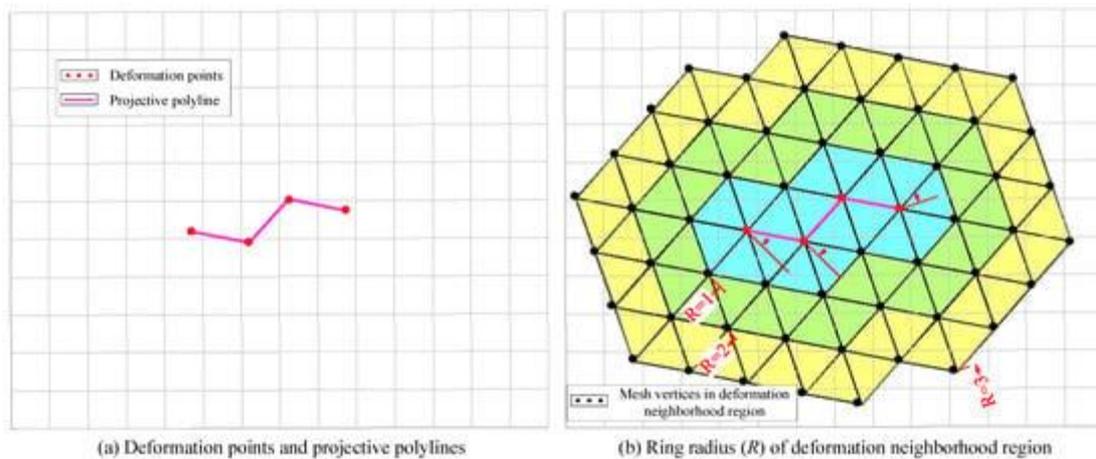


Рис. 6. Определение области окрестности начальной деформации на основе радиуса кольца точек деформации. (а) Точки деформации и проективные полилинии; (б) Радиус кольца ( $R$ ) области окрестности деформации.

Как правило, если контрольная ломаная линия находилась близко к модели, радиус окрестности должен был быть небольшим. Если контрольная ломаная линия находилась далеко от модели, радиус окрестности должен был быть большим. Для определения области оптимальной окрестности деформации сетчатой модели было необходимо проанализировать характеристики области оптимальной окрестности деформации. Во-первых, при определении размера области окрестности деформации необходимо учитывать расстояние между контрольной ломаной линией и моделью. Во-вторых, тренд деформации сетки в области окрестности деформации необходимо было адаптировать к особенностям формы геологических моделей. В-третьих, геологические модели должны были поддерживать приемлемые характеристики и переход в области окрестности деформации до и после деформации. На основе приведенного выше анализа можно в интерактивном режиме скорректировать область окрестности начальной деформации в соответствии с фактическими условиями, как показано на рисунке 7.

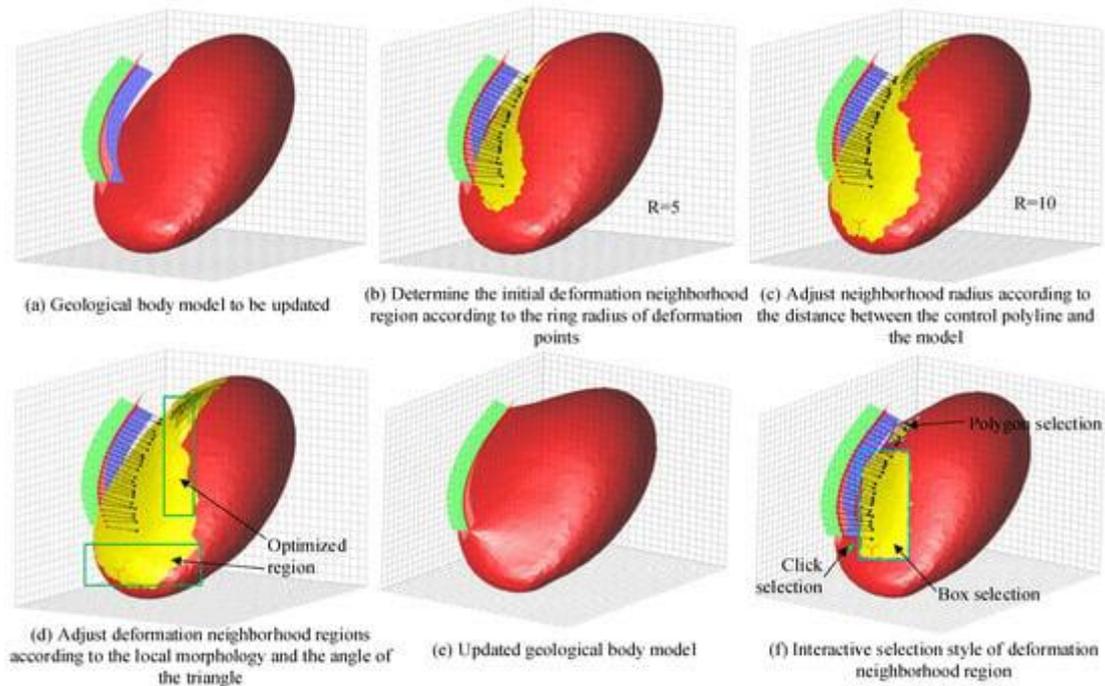


Рис. 7. Определение, корректировка и оптимизация области окрестности деформации (a–f).

### *Деформация ограничений и упрощение сетки.*

На основе согласованных ограничений деформации можно провести локальное динамическое обновление сетчатой модели рудного тела на основе метода преобразования Лапласа. Метод деформации включал набор контрольных точек, используемых для управления тенденцией внешней формы в процессе обновления модели, набор вершин треугольной сетки (т. е. точек деформации или контрольных точек деформации) из проекции контрольных точек для управления деформацией модели, набор вершин областей деформации (т.е. ROI) и набор точек недеформирования (т.е. контрольных точек недеформирования) в ROI.

Уникальное целевое положение для каждой точки деформации, и целевое положение было определено в соответствии с соотношением соответствия между точкой деформации и контрольной точкой. Ограничение деформации было определено в целевом положении каждой точки деформации. В процессе деформации координаты недеформируемых точек обновлялись алгоритмом деформации, в котором был принят алгоритм деформации Лапласа.

Суть деформации сетки Лапласа заключается в получении 3D-координат каждой вершины сетки путем решения линейных уравнений. Таким образом, новая 3D-модель может быть восстановлена после получения новых координат путем решения уравнений. Лапласовское представление точек в поверхностной сетке (т.е. координаты Лапласа) - это метод, используемый для кодирования локальной окрестности вершин в поверхностной

сетке. В этом представлении вершина  $v_i$  связан с 3D вектором, который определяется следующим образом:

$$L(v_i) = \sum_{v_j \in N(v_i)} w_{ij} (v_i - v_j)$$

где  $N(v_i)$  это набор вершин, смежных с  $v_i$ , и  $w_{ij}$  вес направленной кромки  $v_i v_j$ .

Кроме того, упростили сетчатую модель, построив ограничения на упрощение сетки без изменения качества общей сетчатой модели. В частности, треугольные сетки вокруг контрольной полилинии не были упрощены, в то время как остальные сетки были упрощены путем объединения мелких сеток.

Наконец, чтобы гарантировать достоверность сетчатой модели после локального обновления, метод поддерживал определение достоверности сетчатой модели. Кроме того, самопересекающиеся треугольные участки могут быть восстановлены, и можно получить множество достоверных характеристик, которые удовлетворяют модели рудного тела.

#### 4. Результаты.

На основе вышеуказанных алгоритмов, таких как реконструкция сетки и деформация сетки, реализовали метод локального обновления геологической сетчатой модели с использованием Microsoft Visual Studio 2013 (язык C++) (Microsoft, Редмонд, США). Протестировали метод на нескольких реальных геологических наборах данных для локального динамического обновления модели рудного тела. Наборы данных были получены на основе данных реального геологического моделирования.

Необходимо было определить следующие параметры, такие как интервал выборки контрольной ломаной линии  $d_{sam}$  длина стороны грани при реконструкции модели  $l_{rec}$  и радиуса кольца в точке деформации  $r_{def}$ . Использовали следующие начальные значения для всех реальных примеров:  $d_{sam}=1\sim 10$ ,  $l_{rec}=1\sim 10 \leq d_{sam}$ ,  $r_{def}=1\sim 50$ . Поверхностная точность реконструкции модели контролировалась значением  $l_{rec}$ . Чем меньше значение  $l_{rec}$ , тем выше точность.  $r_{def}$  использовался для настройки общего диапазона обновления модели. Чем больше значение  $r_{def}$ , тем больше диапазон обновления.

В соответствии с этим методом провели локальные *тесты динамического обновления моделей рудных тел и моделей геологических тел* соответственно, как показано на рисунках 8 и 9. Чтобы доказать применимость этого метода, выбрали три модели рудного тела с различной геометрической сложностью для модельных экспериментов, показанных на рисунке 8.



Рис. 8. Три примера локального обновления моделей рудных тел (a–d):  
1- первый пример; 2- второй пример; 3- третий пример.

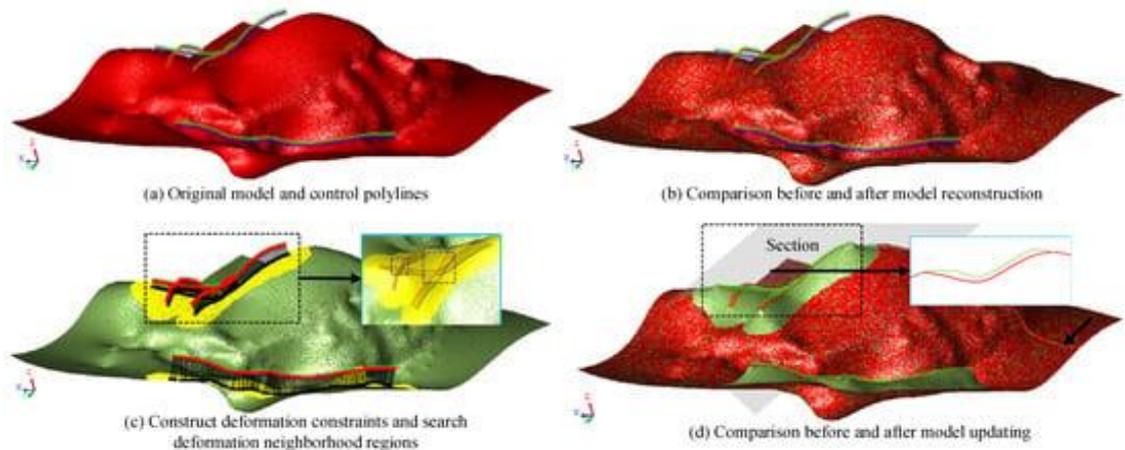


Рис. 9. Пример локального обновления модели геологического тела (a–d).

Процесс эксперимента был следующим. Во-первых, исходные геологические данные были обработаны для получения контрольных полилиний, и были отобраны узлы. Во-вторых,

исходная модель была реконструирована таким образом, чтобы размер ее сетки был меньше или равен интервалу выборки контрольных полилиний. В-третьих, контрольные полилинии были спроецированы и соответствовали точкам деформации. Затем была определена и скорректирована область окрестности обновления в соответствии с точками деформации и значением указанного радиуса кольца. Наконец, модель была обновлена локально с помощью деформации сетки.

На рисунке 8а показаны три типа управляющих полилиний, включая замкнутую полилинию, незамкнутую полилинию и пересекающуюся полилинию. На рисунке 8б показано, что геометрическая форма модели немного изменилась до и после реконструкции сетки, что указывает на то, что эффект реконструкции был удовлетворен. При проектировании контрольной ломаной линии эффект соответствия между контрольными точками и точками деформации был подходящим, и поиск окрестностей в соответствии с радиусом кольца точки деформации также выполнялся хорошо, как показано на рисунке 8с. После обновления модели сравнение точек до и после обновления показало, что метод обновления деформировал и обновил сетчатую модель только в локальном диапазоне, что дало ожидаемый эффект, как показано на рисунке 8д.

Чтобы продемонстрировать надежность метода для различных типов геологических моделей, также провели экспериментальные испытания на модели геологического тела, как показано на рисунке 9. Ввели несколько пересекающихся полилиний в качестве контрольных. Результаты эксперимента показывают, что метод также имел преимущества с точки зрения обновления сетчатой модели геологического тела, топология была хорошо сохранена, и обновленная модель по-прежнему обладала множеством характеристик.

Подводя итог, можно сказать, что метод оказался полезным при решении проблемы локального динамического обновления моделей рудных тел и моделей геологических тел.

*Производительность метода обновления* в основном зависела от размера исходной модели и количества контрольных полилиний. Реализовали алгоритм на C++ и протестировали его на 64-разрядном ПК с Windows (ASUS, Taipei, Китай) с процессором Intel (R) Core (TM) i5-8250U с частотой 3,40 ГГц и 4 ГБ оперативной памяти. В таблице 1 приведены параметры и время выполнения этапов реконструкции сетки и обновления алгоритма на этих примерах.

**Параметры и время выполнения эксперимента**  
(границы модели ( $N_1$ ), контрольные полилинии ( $N_2$ ), время восстановления ( $REC$ ) и обновления ( $UPD$ )).

Examples	$N_1$	$N_2$	$d_{sam}(m)$	$l_{rec}(m)$	$r_{def}$	Time (s)	
						REC	UPD
Figure 8(1)	13,188	5	1	1	9	4.79	1.08
Figure 8(2)	29,420	3	10	10	9	8.33	0.92
Figure 8(3)	59,444	6	1	1	15	11.01	14.47
Figure 9	92,547	7	1	1	20	69.89	65.96

Это показывает, что большее количество треугольных участков и контрольных полилиний требовало более длительного времени расчета. Размер обновляемой области окрестности также повлиял на качество и скорость обновления.

## 5. Обсуждение.

### Ограничения.

Чтобы сделать процесс моделирования и обновления рудного тела более автоматизированным и интеллектуальным, необходимо разработать более автоматизированный, эффективный и надежный метод локального динамического обновления. Однако все еще есть некоторые ограничения, которые необходимо улучшить.

Одно из них заключается в том, что предложенный метод может оказаться непригодным для некоторых особых условий. Во-первых, большая разница между контрольными полилиниями и моделью может привести к аномальному совпадению контрольных точек с точками деформации. Во-вторых, если контрольная ломаная линия слишком длинная, радиус окрестности может не соответствовать тенденции деформации. В-третьих, если модель или контрольная полилиния являются сложными, согласованная проекционная полилиния может быть ненормальной, что приводит к искажению модели после деформации. Следовательно, исходя из ограничений этого метода, для обеспечения качества сетки, необходимо разделить сложную управляющую ломаную линию на несколько сегментных линий и обновлять сложную модель итеративно.

Еще одним ограничением этого метода является то, что для моделей рудных тел особой формы или в особых положениях внутри модели при обновлении модели могут быть потеряны элементы. С одной стороны, если на поверхности модели много вогнутых и выпуклых форм, многие подробные характеристики могут быть потеряны после обновления. С другой стороны, если модель обновляется в острых точках или модель тонкая, четкие черты модели могут быть утрачены. Следовательно, для такого рода специальной модели рудного

тела следует учитывать определение строгих линий и точек, ограничивающих четкие объекты, чтобы гарантировать сохранение этих объектов.

#### *Расширения.*

Для повышения надежности и адаптивности этого метода необходимо удовлетворять требованиям алгоритма к входным данным. Данный подход требует, чтобы входными были набор данных геологической интерпретации и сетчатая модель рудного тела, подлежащая обновлению. При реконструкции модели рудного тела форма модели может в определенной степени измениться. Важным дополнением является то, что реконструируется только область деформации, что может улучшить качество обновления модели. Приведено несколько примеров реконструкции сетки, таких как реконструкция сетки проективной окрестности, которая отражает осуществимость этой расширенной идеи. Кроме того, этот метод применим не только к модели рудного тела, но также применим к некоторым другим поверхностным сетчатым моделям. Он также применим к обновлению твердотельной модели и, таким образом, не ограничивается только поверхностной сетчатой моделью.

Другим важным расширением является то, что, в соответствии с особенностями некоторых моделей и сложностью управляющих полилиний, можем изучить более распространенные и надежные методы ограничения деформации, чтобы улучшить не только адаптивность и надежность метода обновления модели, но также качество и эффективность обновления модели. Особенность модели может быть отражена в особой морфологии (например, тонкое рудное тело или рудное тело со многими морфологическими изменениями), специальной области обновления (например, положение с резкими или значительными колебаниями модели) и т.д. Сложность контрольных полилиний включает интенсивные полилинии, неправильные полилинии, протяженные полилинии и т.д. Таким образом, можем определять некоторые дополнительные ограничительные данные в соответствии с различными ситуациями, улучшить метод обновления модели и сделать метод обновления модели более адаптируемым и более надежным.

#### **6. Выводы.**

1. Представлен метод локального динамического обновления модели рудного тела, который позволяет интерактивно добавлять ограничительные условия деформации и динамическое обновление сетчатой модели в процессе обновления.

2. Основной вклад основан на идее обновления модели реконструкции и деформации сетки. Процесс локального обновления модели рудного тела рассматривается как процесс локальной ограниченной деформации сетчатой модели. Представлен метод локального

динамического обновления модели рудного тела и алгоритм ограниченной деформации сетки модели рудного тела. Этот метод может автоматически обновлять данную 3D-модель рудного тела на основе набора неупорядоченных полилиний геологической интерпретации.

3. Моделирование рудного тела - это динамический процесс, который постепенно совершенствуется по мере непрерывного обогащения данными геологоразведки. Если геологические данные изменяются локально, необходимо повторно интерпретировать полилинии контура, очертить разрезы и соединить параллельные или непараллельные участки.

4. Трудно удовлетворить требования оценки запасов, ресурсов без динамического обновления модели рудных тел на стадиях разведки и добычи. Этим методом можно реконструировать сетчатую модель, строить ограничения деформации в соответствии с новыми геологическими данными и динамически обновлять модель за счет деформации сетки в локальной области модели.

## VII. ТРЕХМЕРНЫЙ ЛОКАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА БАЙЯНХЭ (вулканический пояс Сюэмистан, Синьцзян, Китай) [6].

### 1. Введение.

Теория 3D количественного прогнозирования минеральных ресурсов направлена на достижение определения местоположения и оценки скрытых минеральных ресурсов посредством количественного определения границ и выбора благоприятного сочетания металлогенических факторов. На основе цифровой модели метод позволяет сделать трехмерное прогнозирование скрытой руды с помощью модели прогнозирования cube, которая может дополнить и углубить существующие результаты исследований и послужить важным ориентиром для будущих поисков.

Разведка ураново-бериллиевого месторождения Байяньхэ началась в 1950-х годах, и к настоящему времени накоплено относительно много геологических данных. С 2006 года, в связи с новым раундом разведки полиметаллических урановых руд, было получено большое количество базовых геологических, геофизических и геохимических данных. В частности, в рамках этого исследования была проведена обширная геофизическая и геохимическая съемки, которые предоставили базовые данные для трехмерного прогнозирования и оценки района месторождения Байяньхэ.

Исследования месторождения Байяньхэ проводились в двухмерном режиме, и подземные геологические условия не были показаны в трех измерениях, что приводило к неясному пониманию условий рудообразования. В связи с новым раундом поисковых работ район месторождения Байяньхэ нуждается в новых целевых площадях и увеличении своих ресурсов. На этой основе и возникла данная исследовательская работа.

### 2. Геологические предпосылки.

Ураново–бериллиевое месторождение Байяньхэ является объектом в западном вулканическом поясе Сюэмистан в Джунгарии, Синьцзян. Все рудные тела залегают в Янчжуанском граните. Они характеризуются минимальной мощностью от 0,43 до максимальной в 12,35 м, с коэффициентом вариации 88%. Среднее содержание урана составляет 0,1635%, а коэффициент вариации - 132%. На основе существующей геологической информации о оруденении и анализе благоприятных металлогенических факторов был определен модельный диапазон исследуемой территории.

Геологические объекты месторождения Байяньхэ включают три категории: вулканические породы, граниты и жильные породы (рис. 1).

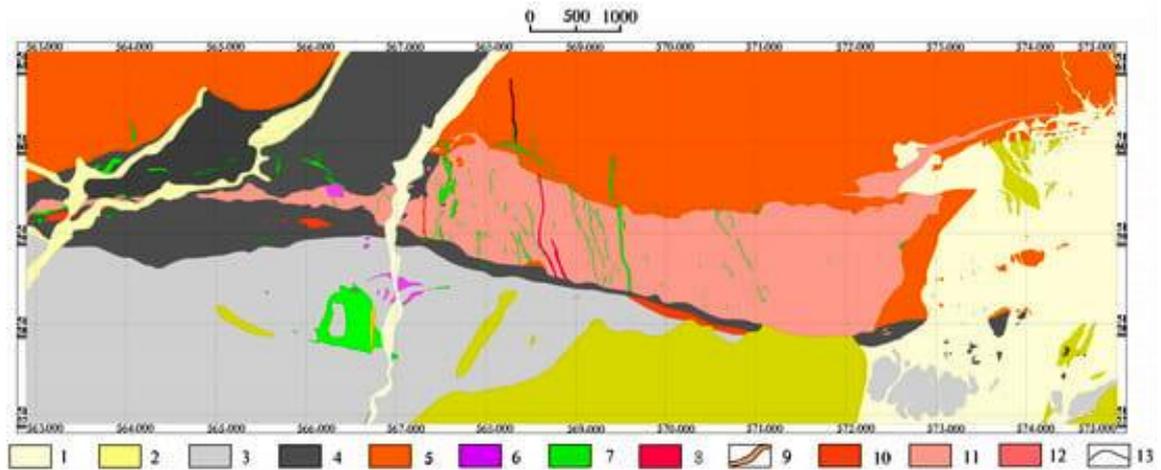


Рис. 1. Диапазон 3D-геологического моделирования. 1—четвертичный период; 2—неоген; 3—Хэйшаньтоу Fm; 4—Хунгулеленг Fm; 5—Сиемиситай Fm; 6—пироксеновый диорит; 7—диабаз; 8—сиенодиорит; 9—сиенитовые жилы; 10—цинтауит; 11—микросталлический гранит; 12—силурийский крупнозернистый калиевый гранит; 13-геологическая граница.

Основными формациями, обнаженными в исследуемом районе, являются силурийская Xiemisitai Fm (S1-4x), верхнедевонская Hongguleleng Fm (D3h) и нижнекаменноугольная Heishantou Fm (C1h). Интрузивные породы представляют собой позднекаменноугольные гранит-порфиры с телом гранодиоритов, протяженностью с востока на запад ~ 10 км. Пространственное распределение гранит-порфиров строго контролируется глубинным Янчжуанским разломом. Мощность - сильно варьируется: максимальная ширина составляет 1,8 км, минимальная - 0,1 км, площадь составляет около 6,9 км<sup>2</sup>. Сиенитовые жилы сопровождаются флюоритизацией. Некоторые части арагонита не выходят на поверхность и выявлены только в скважинах.

Разлом Янчжуан контролирует южную границу гранит-порфирового массива. Он имеет простирание около 100° и наклон 65-75° к северу.

Более 95% урановой минерализации и аномалий развиты вблизи зоны контакта между янчжуанским гранитом и нижними слоями. Локальные рудные тела встречаются в трещинах внутри гранита и ниже зоны контакта на расстоянии не более 50 м.

### 3. Металлогенический прогноз в 3D.

#### 3.1. 3D геологическое моделирование.

На основе платформы программного моделирования SKUA-GOCAD (Университет Нанси, Франция) разработана трехмерная геологическая модель для этого проекта путем интеграции данных из таких секторов, как геология, геофизика, геохимия, дистанционное зондирование и бурение. Благодаря высокой доступности данных, всесторонней интерпретации и взаимной проверке данных, а также высокой точности модели, этот метод

является основной тенденцией развития 3D геологического моделирования в прогнозных целях. Благодаря объединению данных из нескольких источников по месторождению Байяньхэ проект расшифровывает зону разлома Янчжуан в различных разрезах так что получается трехмерная твердотельная модель и устанавливает прочные связи разлома Янчжуан с урановым рудообразованием. Аналогичным образом определяются геологические границы между осадочно-метаморфическими и интрузивными породами. Используя функцию SKUA-GOCAD Model 3d, создается трехмерная геологическая модель исследуемого района путем соединения объемных моделей осадочных и интрузивных пород в тектонической зоне разлома Янчжуан и в соответствии с геологическим интерфейсом от сложного к простому (рис. 2).

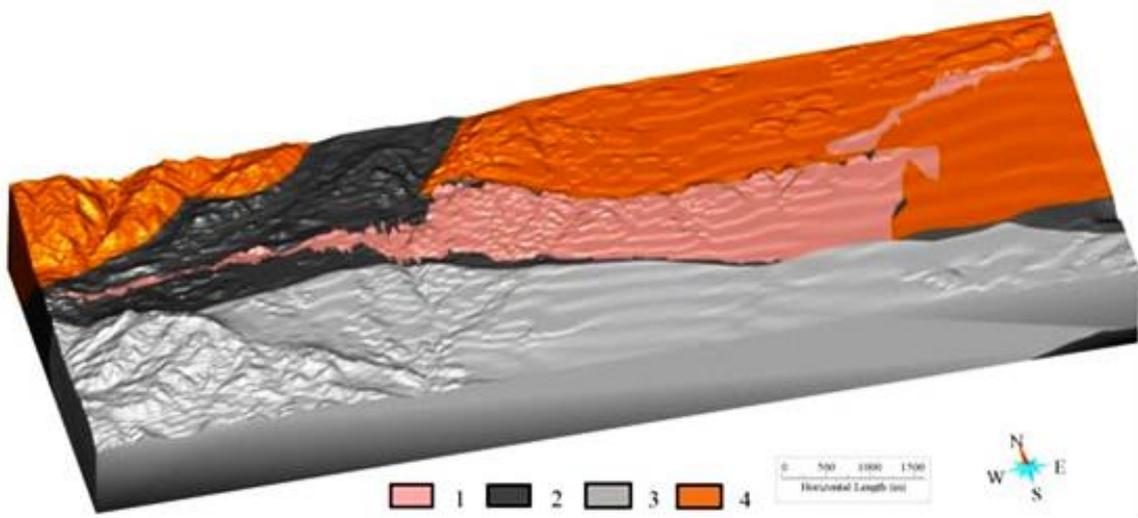


Рис. 2. 3D геологическая модель месторождения Байяньхэ. 1—Гранитно-порфировый комплекс; 2—формация Хунгулеленг; 3—формация Хэйшаньтоу; 4—формация Сюэмиситай.

Диапазон блочной модели определяется в соответствии с масштабом 3D геологической модели. Согласно этому опыту моделирования, размер блока может быть определен в зависимости от протяженности сети разведочных линий, размера рудного тела, сложности границы рудного тела и требований к проектированию горных работ. Как правило, размер блока может составлять 1/5–1/10. Однако, принимая во внимание производительность компьютерной обработки и размер объема данных, в этом исследовании производится классификация единичного блока строка×столбец×слой: 80×50×10м, и модель включает 1 822 419 блоков. Взяв установленную трехмерную геологическую модель в качестве ограничивающего условия, количественно извлекли и проанализировали информацию о геологических элементах, контролирующих руду, а также извлекли благоприятную геохимическую информацию, таким образом сформировав модель количественного прогнозирования.

### 3.2. Создание модели количественного прогнозирования.

Информация о контролирующих руду геологических элементах включает данные о металлогенической структуре, о границах раздела пород и о структуре жильных комплексов.

Структура трещин в исследуемом районе является критическим фактором, контролирующим распределение урановых рудных тел. Они развивались вдоль определенного масштаба разломов или трещин.

Наиболее развиты урановые рудные тела в зоне контакта янчжуанского гранита с окружающей породой. Она сопровождается интенсивной трещиноватостью. Эта зона представляет собой как канал для металлогенических флюидов, так и рудофокусирующую структуру. Она сопровождается гидротермально-метасоматическими изменениями как гранитоидов так и вмещающих пород.

Контактная зона разлома Янчжуан была «забуферена» на 100 м севернее, в качестве металлогенической структурной информации (рис. 3). Количественный анализ информации о структуре трещин включал изоплотность, частоту, ориентацию и др. Чем выше изоплотность трещин, тем сильнее минерализация.

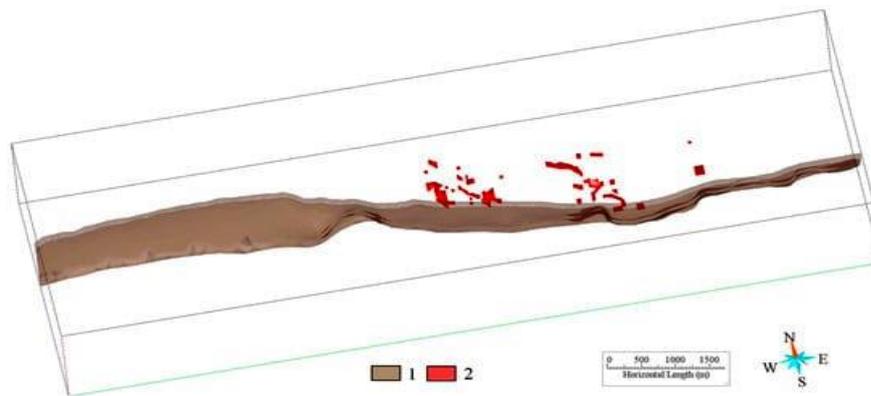


Рис. 3. Буферная зона трещин в районе месторождения Байяньхэ. 1—северная контактная зона разлома Янчжуан; 2— урановые рудные тела.

Согласно статистике, интервал (0,019–0,075) является оптимальным интервалом распределения изоплотности (рис. 4), который принимается за благоприятную информацию для минерализации.

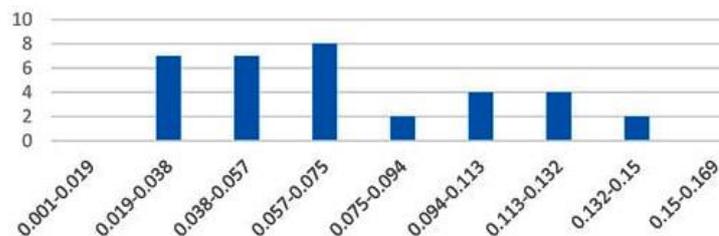


Рис. 4. Распределение изоплотностей разломов минеральных блоков на м-нии Байяньхэ.

Частота трещиноватости непосредственно отражает сложность структурного каркаса. Согласно статистике, общее количество рудных тел в интервале (0,52–0,98) составило около 70% от общего количества рудных тел, что можно было бы принять за благоприятную металлогеническую информацию.

Уровень ориентации оруденелых трещин относится к характеристике пространственной ориентации структуры района. Согласно их количественному анализу, благоприятный интервал равен (0–0,02), (0,09–0,11), и (0,19–0,24).

Главный разлом относится к структуре с большой вертикальной глубиной и длинным горизонтальным протяжением. Она также имеет количественную оценку (рис. 5). Благодаря количественному извлечению региональной информации о главном разломе и анализу наложения известных рудных тел, благоприятный диапазон количественных металлогенических значений главного разлома составляет (0,005–117,86).

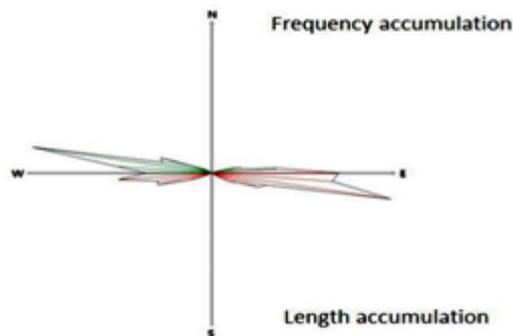


Рис. 5. Структурная ориентация.

Эти и подобные параметры отражают пространственные характеристики металлогенической зоны и предоставляют новые и эффективные переменные для прогнозирования.

Урановые рудные тела в исследуемом районе в основном локализуются во внутренней и внешней контактных зонах гранита Янчжуан с акцентом на внутреннюю контактную зону. Урановые рудные тела обычно имеют мощность от нескольких до десятков метров от зоны контакта. Крупные рудные тела обычно расположены горизонтально, развиваясь параллельно вдоль пограничной зоны контакта. Те из них, которые залегают в породах, удаленных от зоны контакта, являются вертикальными. Более мелкие вторичные рудные тела, вдоль структурных трещин, составляют ограниченное количество ресурсов месторождения. Это указывает на важность контактной зоны, контролирующей минерализацию урана.

Урановое оруденения залегают в основном в пределах 50 м от зоны контакта с гранит-порфиром. Поэтому верхние и нижние 50 м границы раздела гранита были взяты в качестве

продуктивной информации. Восемьдесят процентов рудных тел распределено в этой области (рис. 6).

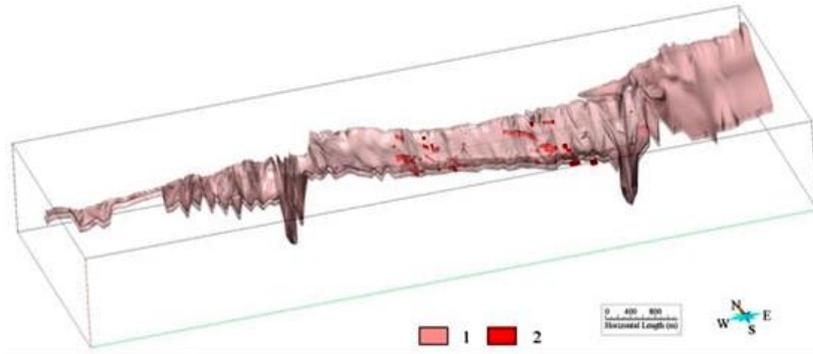


Рис. 6. Взаимосвязь между нижней пограничной буферной зоной гранита и урановым оруденением.  
1 — нижняя пограничная буферная зона; 2—урановые рудные тела.

С гранитоидами Янчжуан связаны жильные комплексы диабазов и сиенитов, секущие буферную зону под углами в  $70-80^{\circ}$ . Существует тесная пространственная взаимосвязь между этими комплексами, урановым оруденением и ожелезнением. Как правило, ширина железистых изменения по обе стороны жил составляет 2-5 м. После вертикального блочного разделения жил и известных рудных тел статистические результаты показывают, что в зону жил попадает в общей сложности 58 рудных тел, что составляет 26,7% от их общего количества. Таким образом, это указывает на то, что распространение жильных комплексов напрямую связано с пространственным распределением рудных тел. В этом проекте жилы, расположенные на расстоянии 5 м слева и справа, были взяты в качестве прогнозной информации (рис. 7).

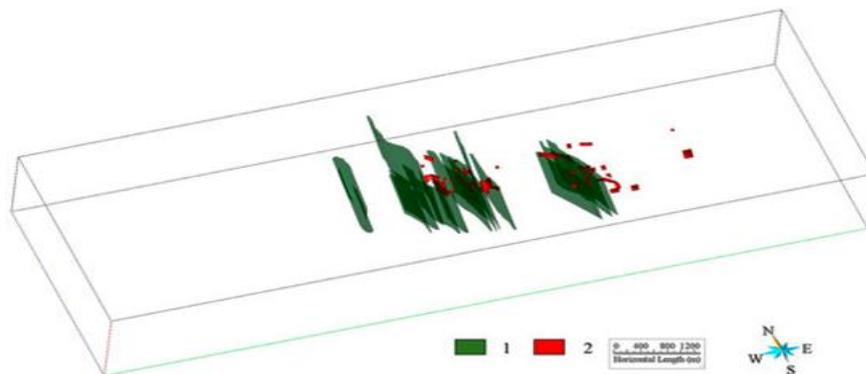


Рис. 7. Распределение жильных зон и урановых рудных тел.  
1 — жильные зоны; 2— урановые рудные тела.

Были определены семь геохимических аномалий, включая U, Mo, Pb, Ba, Sr, почвенную аномалию Rn и U-аномалию наземной гамма-спектрометрии. Статистические данные о распределении геохимических аномалий и известных рудных тел были получены с помощью вертикальной кубической обработки (рис. 8). Область наземных гамма-спектрометрических аномалий U включает в себя 218 рудных блоков или 96,5% от известных. Это означает, что

эта область возможно связана с глубинным рудным очагом. Другие геохимические аномалии: Ba, Mo, Sr, U и Rn почвы слабо коррелируют с известными рудными телами.

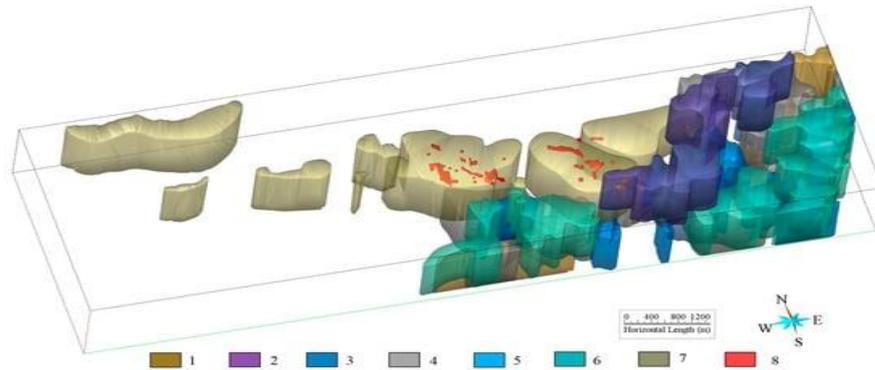


Рис. 8. Связь между геохимическими аномалиями и урановыми рудными телами.  
1—Ba; 2—Mo; 3—Pb; 4—Rn; 5—Sr; 6—U; 7—U-гамма-спектрометрия; 8—урановые рудные тела.

В соответствии с геологическим фоном исследуемого района и анализом благоприятной металлогенической информации, а также в соответствии с фактической ситуацией была создана модель прогнозирования исследуемого района (табл. 1).

Табл. 1.

**Модель прогнозирования в исследуемом районе.**

Category	Ore-Controlling Factor	Metallogenic Predictor	Characteristic Variable
Geology	Structure	Structural distribution characteristics	Fracture buffer zone
			100 m buffer area of fracture crushing zone
			Fracture isodensity (0.019–0.075)
	Granite's bottom interface	Favorable metallogenic area	Fracture frequency (0.52–0.98)
			Fracture anomaly orientation (0.59–0.63, 0.95–1)
			Anomaly level of fracture orientation (0–0.02, 0.09–0.11, 0.19–0.24)
Rock veins	Favorable information about rock veins	Main fracture (0.005–117.86)	
50 m buffer area around the granite's bottom interface		5 m buffer zone around the rock vein	
Geochemical exploration	Geochemical exploration	Geochemical anomaly information	Seven anomalies of Ba, Mo, Pb, RN, Sr, U component, and U energy spectrum

Также было согласовано, что значение каждого маркера в блоке равно 1, а при отсутствии значения - равно 0. Другими словами, блочная модель была бинаризована, чтобы облегчить последующее металлогеническое предсказание.

#### 4. Результаты прогноза.

Был проведен анализ, обобщение и корректировка геологических, металлогенических и математических моделей в исследуемом районе, использовано программное обеспечение для проведения цифрового 3D-моделирования района и создания кубической модели

прогнозирования. В соответствии с этой моделью был выбран соответствующий математический метод статистической обработки данных и составлена количественная статистика долей известных рудных блоков в каждом благоприятном интервале. В соответствии со статистикой конвергенции данных, предел благоприятной степени делится на основе процента известных рудных тел в благоприятном интервале, а затем определяется перспективный район. Используемые математические методы прогнозирования включали: анализ условных вероятностей, анализ характеристик, трехмерные веса доказательств, трехмерную информацию, факторный анализ, метод Монте-Карло и т.п.

#### 4.1. Метод взвешенных доказательств.

Метод взвешивания доказательств состоит из трех частей: вычисления априорной вероятности, вычисления весов доказательств и определения апостериорной вероятности. Вес металлогенических элементов в исследуемом районе приведен в таблица 2.

Табл. 2.

Значения веса металлогенических элементов в исследуемом районе.

Evidence Item	W+	S (W+)	W-	S (W-)	C
Mo anomaly	0.722296	0.217986	0.05099	0.069839	0.77329
Pb anomaly	0.631068	0.300863	0.02331	0.068196	0.654376
U energy spectrum	2.057473	0.067754	3.20329	0.352455	5.260766
Yangzhuang fracture	0.533274	0.288106	0.02254	0.068355	0.555818
Rock veins	2.666186	0.131367	0.27826	0.077144	2.944442
Granite's bottom interface	3.221804	0.074435	1.58029	0.14899	4.802094
Isodensity	0.614739	0.266816	0.02952	0.068676	0.644255
Anomaly orientation	2.480429	0.223493	0.08496	0.069669	2.565391
Frequency	1.155135	0.223372	0.06407	0.069669	1.219206
Anomaly level of orientation	1.902034	0.266896	0.05439	0.068676	1.956425
Main fracture	0.812505	0.171397	0.09358	0.072163	0.906088

W+ и W-, соответственно, представляют вес в районе с коэффициентом фактических данных или без него, а значение С представляет актуальность фактора фактических данных и актуальность металлогенических данных. Согласно результатам расчета, наиболее весомыми являются значения наземной гамма-спектрометрии U и границы гранитного блока.

Апостериорное значение вероятности каждой единицы прогноза рассчитывается в соответствии с весовым значением металлогенических элементов, интервал делится в соответствии с размером значения, и даются разные цвета отображения (рис. 9 и 10).

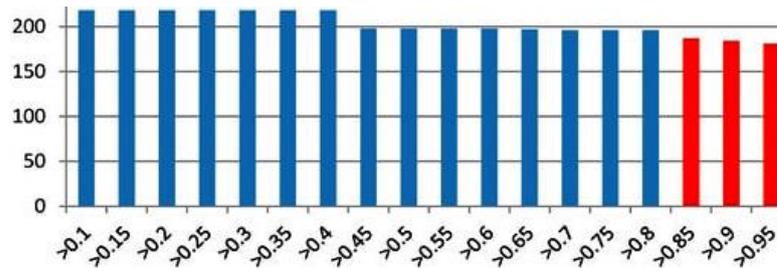


Рис. 9. Апостериорный вероятностный результат.

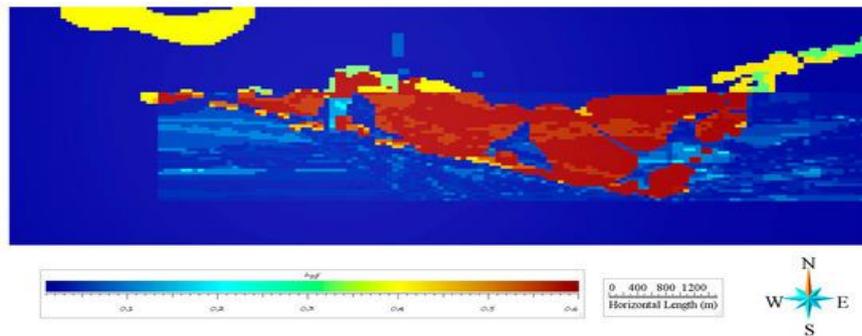


Рис. 10. Статистика апостериорной вероятности.

Согласно рисунку 10, апостериорное значение вероятности резко меняется в пределах от 0,8 до 0,85. Поэтому в качестве минимального ограничивающего условия для этого прогноза выбрано апостериорное значение вероятности 0,85. Согласно статистике, кубический блок  $\geq 0,85$  содержит 82,74% известных рудных тел.

#### 4.2. Метод информационной разведки.

Метод информационной разведки представляет собой непараметрический одномерный статистический метод анализа для изучения влияния геологических элементов на прогнозирование путем анализа распределения различных геологических элементов в исследуемом районе. Сумма информации из геологических элементов в блоке cube в 3D-прогнозе отражает значимость прогнозирования этого блока. Информационная ценность металлогенических элементов рассчитывается путем количественного анализа и статистики металлогенических элементов в исследуемом районе (табл. 3).

Табл. 3.

Масштаб информации о металлогенических элементах в исследуемом районе.

Information Layer	Number of Marker Unit	Number of Information Layer Unit	Information Volume Value
Mo anomaly	21	80,716	0.3202219
Pb anomaly	11	46,870	0.27545997
U energy spectrum	213	218,865	0.89316552
Yangzhuang fracture	12	55,794	0.23755598
Rock veins	56	31,996	1.14805457
Granite' bottom interface	175	57,373	1.38929272
Isodensity	14	59,756	0.27470875
Anomaly orientation	20	13,296	1.08227122
Frequency	19	49,727	0.48712358
Anomaly level of orientation	14	16,695	0.82850385
Main fracture	34	118,596	0.36237111

На основе этих результатов информационная область делится в соответствии с объемом информации, в соответствии с геологическим фоном и металлогенией района исследований, а затем всесторонне подсчитывается количество рудных единиц, содержащихся в информационном интервале (рис. 11).

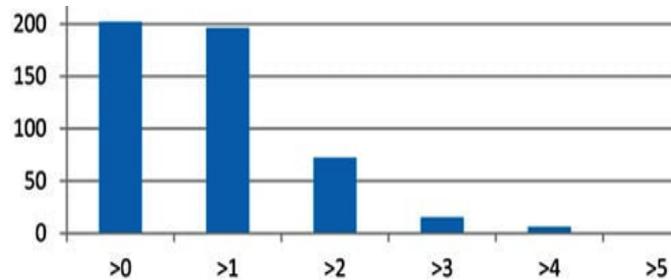


Рис. 11. Статистика совпадения информации с известными рудными телами в исследуемом районе.

#### 4.3. Анализ результатов прогноза.

Руководствуясь апостериорным вероятностным интервалом и основываясь на информационной ценности, рассчитывается соотношение блоков руды (известное количество блоков руды в информационном интервале/общее количество известных блоков руды), соотношение блоков (общее количество блоков в информационном интервале/общее количество блоков в исследуемой области) и пропорции блока руды/блок (рис. 12).

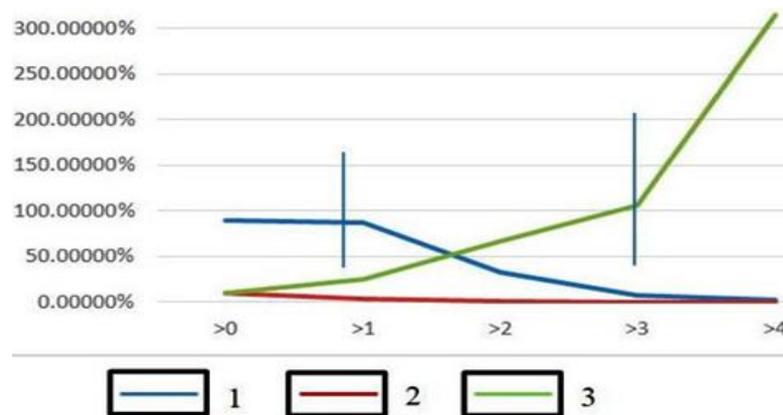


Рис. 12. Региональный информационно-статистический анализ.  
1—Доля рудных блоков; 2 —Доля блоков; 3—Коэффициент рудоносности.

По мере увеличения ценности информации соотношение руды (рудный блок/блок) сближается, что доказывает, что прогноз соответствует статистическому правилу. Кроме того, для выражения концентрации руды используется соотношение руды к блоку. Ценность информации делится на два интервала: ценность информации больше 3, и ценность информации меньше или равна 3 и больше 1.

Согласно статистике, в районе имеется 1141 благоприятных металлогенических блоков с апостериорной вероятностью  $\geq 0,85$  и информационной величиной  $> 3$ , что составляет 0,06 из 1 822 419 известных кубических блоков.

#### 4.4. Определение перспективных зон.

В соответствии с распределением благоприятных металлогенических блоков в трехмерном пространстве были очерчены девять перспективных участков А, В, С, D, E, F, G, H и I (рис. 13 и 14).

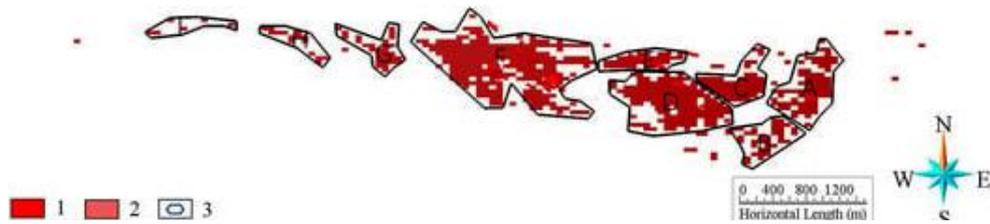
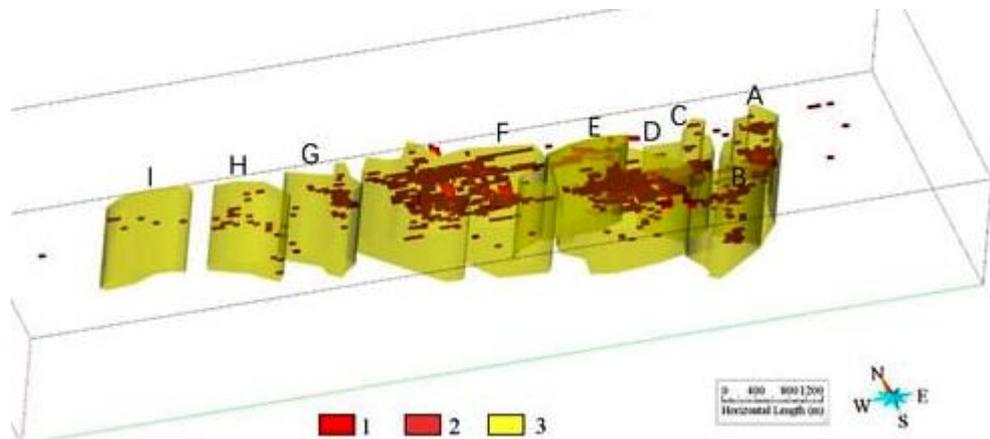


Рис. 13. Распределение перспективной металлогенической площади (2D).  
1 — Рудная масса; 2 — Благоприятный блок; 3 — Область прогнозирования урана.



Рис/ 14. Распределение перспективной металлогенической зоны (3D).  
1 — Рудная масса; 2 — Благоприятный блок; 3 — Прогнозируемая зона урана.

А: Восточный контактный пояс гранита Янчжуан. В этой области прогнозирования: направление X: 572 146 м–573 060 м; направление Y: 5 158 185 м–5 159 280 м; и направление Z: (290 м) – (1200 м).

В: Магматический канал в граните Янчжуан на юго-востоке. В этой области прогнозирования: направление X: 571 697 м–572 612 м; направление Y: 5 157 712 м–5 158 350 м; и направление Z: (40 м) – (1200 м).

С: участок №7 - центральная секция участка. В этой области прогнозирования: направление X: 571 297 м–572 177 м; направление Y: 5 158 464 м–5 159 224 м; и направление Z: (790 м) – (1200 м).

Д: участок №2 на юго-востоке-участок №5. В этой области прогноза: направление X: 570,257 м–571,737 м; направление Y: 5,158,108 м–5,158,891 м; и направление Z: (90 м) – (1194 м).

Е: участок №2. В этой области прогноза: направление X: 570,131 м–571,193 м; направление Y: 5,158,889 м–5,159,170 м; и направление Z: (94 м) – (1144 м).

F: участок №3–№8. В этой области прогноза: направление X: 567,887 м–570,076 м; направление Y: 5,158,316 м–5,159,652 м; и направление Z: (240 м) – (1190 м).

G: участок №9. В этой области прогнозирования: направление X: 566,986 м–567,823 м; направление Y: 5,158,827 м–5,159,478 м; и направление Z: (244 м) – (1196 м).

H: Гранит Восточного Асуда. В этой области прогнозирования: направление X: 566 075 м–5 669 245 м; направление Y: 5 158 938 м–5 159 440 м; и направление Z: (40 м) – (1200 м).

I: гранит Западного Асуда. В этой области прогнозирования: направление X: 564 708 м–565 805 м; направление Y: 5 159 294 м–5 159 538 м; и направление Z: (740 м) – (1040 м).

#### **4.5. Оценка прогнозных ресурсов.**

Формула расчета ресурсов урана:

$$Q_m = \sum(V_i \cdot C_i \cdot \rho \cdot t \cdot k)$$

где  $Q_m$  представляет содержание металла,  $V_i$  - объем руды,  $C_i$  - среднее содержание руды,  $\rho$  - удельный вес руды,  $T$  - коэффициент несущей способности руды и  $k$  - поправочный коэффициент.

Согласно предыдущим отчетам по разведке, среднее содержание руды составляет 0,185%, а удельный вес руды составляет 2,62 т /м<sup>3</sup>. Для получения более точной оценки ресурсов в интервале прогноза было проведено тестирование в районе известного рудного тела, и проведен расчет интерполяции с использованием метода Криге. Затем был оценен известный размер рудного тела и проведен сравнительный анализ с масштабом металла в районе. Коэффициент рудоносности равен 0,0008. Поправочный коэффициент по апостериорной вероятности равен 0,85. На этой основе были рассчитаны ресурсы, в районе прогноза.

В настоящее время выявленные ресурсы урана месторождения Байяньхэ соответствуют среднему и крупному масштабам, что указывает на то, что гранит Янчжуан и его периметр обладают хорошим металлогеническим потенциалом. Были предсказаны десять металлогенических перспективных участков урана и определены три целевые поисковые площади.

В рамках данного исследования было проведено бурение в прогнозируемых перспективных участках А и В. Были получены пять скважин с промышленным содержанием урана, две скважины с рядовой минерализацией урана, четыре скважины с промышленным содержанием бериллия, две скважины с промышленным и одна с рядовым содержаниями молибдена.

## **5. Выводы.**

1. Трехмерная геологическая модель создана путем систематического сбора, систематизации и анализа геофизических и геохимических исследований, дистанционного зондирования и бурения.

2. Основными элементами для количественного анализа 3D модели уранового месторождения Байянгэ являлись: геологическая структура, буферные зоны гранитоидных блоков, жильные комплексы и геохимические аномалии.

3. Для повышения точности количественного 3D-прогноза использованы методы «взвешенных доказательств» и «информационной разведки». В результате в трехмерном пространстве были очерчены девять перспективных участков.

4. В результате заверочного бурения на двух из них были получены пять скважин с промышленным и рядовым содержаниями урана, бериллия и молибдена.

## VIII. ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАОЗИГОУ (*Западный Циньлин, Китай*) [1].

### 1. Введение

В настоящее время основным методом прогнозирования «скрытых» ресурсов является основанный на 3D-моделировании количественный прогноз полезных ископаемых на глубине, и его ключевыми технологиями являются: (1) 3D визуальное представление металлогенической геологической массы, металлогенической структурной зоны и геохимии; (2) 3D извлечение информации о минерализации на основе технологии пространственного анализа; и (3) исследования распределения и прогнозирования минерализации на основе методов анализа данных. Трехмерный количественный прогноз минеральных ресурсов приобретает все большее значение при разведке скрытых месторождений полезных ископаемых. По мере того, как 3D-модели становятся все более совершенными, а методы извлечения информации о минерализации продолжают развиваться и углубляться, научная строгость и практическая полезность прогнозирования минеральных ресурсов могут значительно возрасти.

Основой 3D-картирования перспективности является 3D-геологическая модель, и, следовательно, 3D-геологическое моделирование стало важной частью 3D-металлогенического прогнозирования. Соответствующий подход заключается в интеграции геологической информации, такой как топография, геологическое картирование, каротаж керна, геологический разрез и результаты геофизической инверсии, для улучшения характеристики сложного геологического массива в 3D-пространстве. Саймон У. Хоулдинг впервые предложил 3D-геологическое моделирование в сочетании с системами геологического моделирования, включая 3D-представление геологической массы. Подход к 3D-геологическому моделированию в основном основан на моделировании данных бурения, профилей разведки и т.д. В основном применяется для высокоточного геометрического моделирования массивов горных пород, разломов и рудных тел в масштабе рудного месторождения, и ключевым моментом является контроль точности моделирования для удовлетворения сложных требований 3D-визуализации сложных геологических массивов и структур.

Первичная идентификация геохимического ореола является распространенным геохимическим подходом для обнаружения рудных тел вблизи поверхности или на глубине. Первичный геохимический ореол - это область пород, окружающих рудные тела, обогащенных рудообразующими элементами. Первичные геохимические характеристики

предоставляют важную информацию для прогнозирования глубинных запасов полезных ископаемых, поскольку они отражают геохимические процессы осаждения металлов и минералообразования. Для определения первичных характеристик ореолов месторождений использовалось множество методов, включая вертикальную зональность элементов, соотношения элементов с привязкой к рудным зонам, соотношения элементов Пирса и индексы изменений. Основным аспектом этих методов является определение пространственных распределений отдельных элементов и/или их ассоциаций.

Практика геохимических исследований показала, что первичные гало- или геохимические исследования горных пород являются одним из наиболее эффективных методов определения глубины эрозии рудных месторождений, определения залегания рудных тел, поиска скрытых рудных тел и составления прогнозных карт. Геохимические аномалии в первичном ореоле являются важным показателем присутствия потенциальных рудообразующих тел на глубине, и многие тематические исследования показали наличие первичных ореолов с преобладанием рудообразующих элементов вокруг рудных тел золота, серебра, меди, свинца и цинка, особенно гидротермальных месторождений, где развит широкий спектр первичных геохимических аномалий.

Сверточная нейронная сеть (CNN), как наиболее успешная модель нейронной сети, применяемая в глубоком обучении, успешно применяется в области геологии, такой как распознавание литологии, геологическое картографирование и трехмерная инверсия геологической структуры. В последние годы также добились хороших результатов в применении сверточных нейронных сетей для разведки полезных ископаемых и прогнозирования.

В данном исследовании рассматривается научная проблема “трехмерного детального моделирования пространства минерализации”, в качестве области исследования берется золоторудное месторождение Заозигоу в горах Западный Циньлин, строятся геологические и геохимические модели с использованием алгоритмов глубокого обучения 3D сверточной нейронной сети и прогнозируются две цели разведки на глубине.

## **2. Геологические условия.**

Регион Западный Циньлин расположен в западной части Циньлинского орогенного пояса. Он ограничен поясом Килиан на севере, массивом Кайдам на западе и террейном Сонгпан-Гарзе на юге (рис. 1а). Его геологическая эволюция тесно переплетена с историей тектонической области Тетис и конвергенцией массива Янцзы и Северо-Китайской плиты.

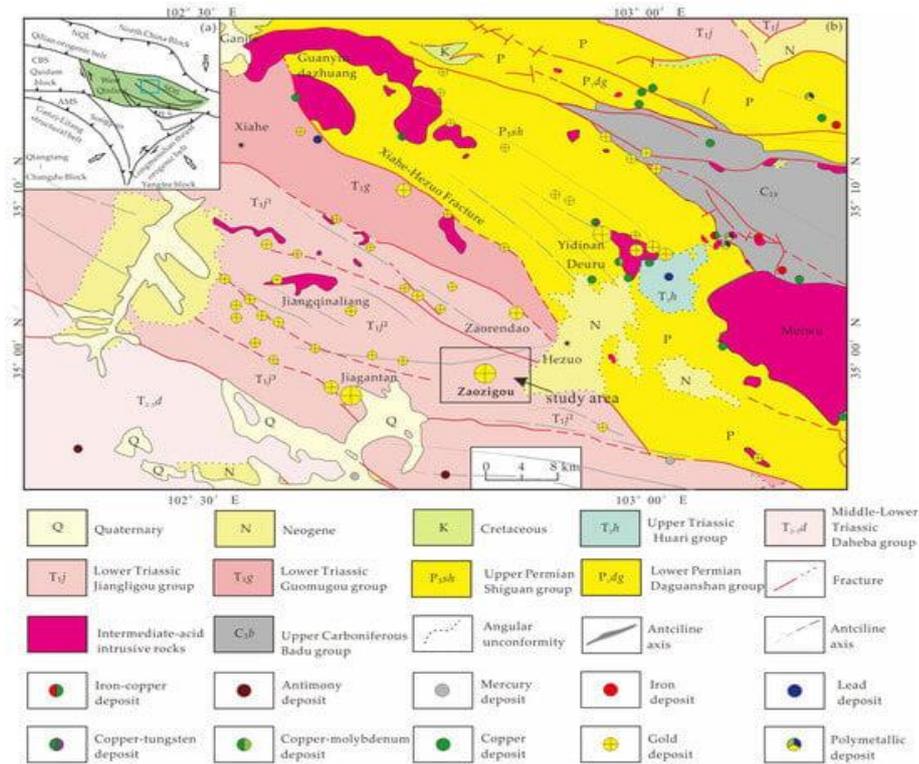


Рис. 1. (а) Геологическая схема — тектонический пояс Северный Циньлин; SDS — древняя шовная зона Шангдан; CBS — древняя шовная зона Северный Кайдам; AMS — древняя шовная зона А'Ньемакен; MLS — шовная зона Мянлуэ. (б) Карта распределения основных полезных ископаемых в районе Сяхэ-Хэцзуо.

Обнажающиеся пласты в районе Сяхэ-Хэцзуо состоят в основном из мезозойских и позднепалеозойских образований, и они, как правило, распределены вдоль линий разломов, направленных на северо-запад. К северу и югу от разлома Сяхэ-Хэцзуо развиты мезозойские и позднепалеозойские толщи, соответственно, при этом в северном регионе преобладают каменноугольные и пермские формации, а южный регион в основном состоит из триасовых формаций, спорадически обнажающих неогеновые и четвертичные образования (рис. 1б). Геологическая структура района в основном состоит из складок и разломов. Складки в сочетании с разломами совместно контролируют распределение месторождений золота. Разломы преимущественно имеют северо-западное направление, они служат основными каналами для миграции магма-гидротермальных флюидов. Месторождения золота в основном расположены вблизи разломов, и тенденция их распределения совпадает с ориентацией разломов. Кроме того, наличие разломов также влияет на характер распределения яншаньских средне-кислых интрузивных пород.

Золоторудное месторождение Заозигоу является типичным неглубоким низкотемпературным гидротермальным рудным объектом в районе Сяхэ-Хэцзуо (черный прямоугольник на рис. 1б). Оно является типичным представителем золоторудного

месторождения, связанного с дайками средней кислотности на юге разлома Сяхэ-Хэцзуо. Основное оруденение общей площадью около 2,6 км<sup>2</sup> (рис. 2).

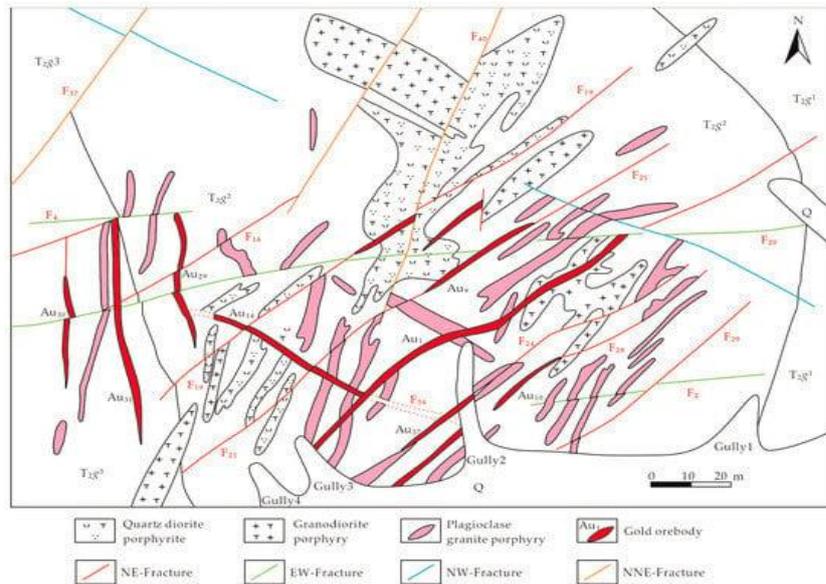


Рис. 2. Геологическая карта золоторудного месторождения Заозигоу.

Геологические образования, в Заозигоу, относительно однородны, в основном состоят из триасовых и четвертичных слоев. Четвертичные отложения преимущественно расположены в южной и восточной частях территории. Триасовые образования относятся в основном к нижней части среднетриасовой группы Гулангди (T<sub>2g1</sub>). Формация включает в себя осадочный цикл снизу доверху, состоящий из алевролита → глинистого сланца → известкового сланца. Разломы в целом подразделяются на две группы: в направлении восток–запад (EW), и северо-восточном (NE) направлении. Как показано на рисунке 1, разломы северной ориентировки представляют собой крупные региональные разломы, в основном служащие каналами для миграции рудообразующих гидротермальных флюидов. Разломы, в других направлениях, таких как NE, NS и EW, считаются вторичными и представляют собой участки для отложения руды. Интрузивные породы - кварцевый диорит-порфирит, гранодиорит-порфир и плагиоклаз-гранит-порфир преимущественно распределены вдоль северо-восточного тренда, включая структуру распределения золотых рудных тел. В целом, разломы делятся (рис. 2) на четыре основные ориентации: NW (синяя), NE (красная), E–W (зеленая) и NNE (оранжевая).

Как правило, рудовмещающими являются дайки средней кислотности, состоящие из мелкокристаллического диорита, диорит-порфирита, биотит-диорит-порфирита и кварц-диорит-порфирита. Эти дайки демонстрирует преобладающий тренд в северо-восточном направлении.

На сложную минерализацию в пределах месторождения значительное влияние оказала региональная много-периодическая активность глубинных разломов, в результате чего последовательные фазы магматизма перекрывались на нескольких стадиях минерализации.

На золоторудном месторождении Заозигоу обнаружено 147 рудных тел, из которых 17 рудных тел являются основными рудными телами с запасами золота более 1 тонны, при этом общий запас золота составляет более 100 тонн. В соответствии с пространственным распределением и сочетанием минерализации месторождение Заозигоу можно разделить на восточный и западный рудные блоки (табл. 1).

Табл. 1.

<b>Рудные тела и трещиноватость.</b>			
<b>Ore Block</b>	<b>Orientation</b>	<b>Fracture</b>	<b>Orebody</b>
Eastern ore block	NE	F19–F27	Au1, Au9, Au10, Au15, Au45, Au46, Au16, Au17, Au21, Au37, Au52, Au55
	NWW	F3	M6, M4
Western ore block	NW	F42, F41, F34	Au14
	N-S	F13–F11, F9–F8	Au29, Au31

Изменения окружающих пород в основном представлены окремнением (стибнитовое оруденение, пиритизация и арсенопиритизация) → серицитизацией (хлоритизация и эпидотизация) → гематитизацией и карбонизацией.

Металлогенический процесс делится на гидротермальную и супергенную минерализации. Гидротермальный период дополнительно делится на четыре фазы: (1) фаза раннего окремнения–гематитизации; (2) фаза кварц–пирит–арсенопирит, где формируется рудный минеральный комплекс: кварц → пирит → арсенопирит → самородное золото (основная фаза золотообразования месторождения); (3) фаза кварц–стибнит–кальцит (анкерит), где минеральный состав и последовательность составляют кварц → пирит → арсенопирит → стибнит → самородное золото; и (4) кварц–кальцитовая фаза, где минеральный состав и последовательность составляют кварц → кальцит → каолин.

В период супергенного оруденения, который относится к яншаньско–гималайской стадии, первичные руды вблизи поверхности земли окислялись в рамках супергенного геологического процесса, образуя лимонит и покраснение, связанные с региональным коллизионным орогенезисом и поднятием плато, а породы имеют аллотриоморфную, метасоматическую реликтовую и альвеолярную текстуры.

### **3. Сверточная нейронная сеть и архитектура модели 3D-CNN.**

Сверточные нейронные сети (CNN), как широко используемые алгоритмы глубокого обучения, эффективно изучают закономерности объектов из выборочных данных. Используя

операции многослойной свертки, они автоматически извлекают информацию об особенностях входных данных, выявляя сложные закономерности. В сверточной нейронной сети, помимо входного и выходного слоев, скрытые слои включают сверточные слои, слои функции активации, слои объединения и полностью связанные слои.

*Сверточный слой* является ядром, отражающим локальные характеристики связности и распределения веса сверточных нейронных сетей. Он использует фильтры для извлечения локальных объектов из общих данных, а затем, сдвигаясь с определенным шагом, извлекает объекты данных из разных положений, в результате чего получается карта объектов.

$$O_{i,j} = \sum_{u,v} I_{i+u,j+v} \times K_{u,v} \quad (1)$$

где  $O_{i,j}$  является элементом карты выходных объектов,  $I$  - входное изображение,  $K$  - ядро свертки, а  $u$  и  $v$  - пространственные индексы ядра свертки.

После операции свертки вводится нелинейная функция активации. Используется функция *ReLU*, которая не только обеспечивает эффективность обучения, но и ускоряет скорость обучения. Формула расчета приведена в уравнении (2).

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{if } x \geq 0 \\ 0, & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Объединяющий слой служит для постепенного уменьшения пространственных размеров, тем самым уменьшая количество параметров и вычислительных требований при одновременном увеличении восприимчивого поля. Наиболее распространенной операцией опроса является максимальное объединение.

В пределах полностью связанного слоя каждый нейрон поддерживает связи со всеми нейронами предыдущего слоя. Эти слои отвечают за такие задачи, как классификация или регрессия, используя универсально выделенные признаки.

$$O = \sigma(W \times I + b) \quad (3)$$

где  $W$  - матрица весов,  $I$  - входные данные,  $b$  - вектор смещения, а  $\sigma$  - функция активации, такая как Softmax.

В этом исследовании использовался Lenet-5 CNN, состоящий из семи слоев сетевой структуры. За входным слоем следуют две комбинации сверточных слоев и слоев объединения, которые затем проходят через транспонированные сверточные слои. Наконец, функция Softmax используется для нормализации выходного слоя. В рамках этой модели функция *ReLU* используется в качестве функции возбуждения слоя свертки.

Трехмерные сверточные нейронные сети обладают уникальным преимуществом изучения пространственных позиционных взаимосвязей между данными. В контексте

трехмерных задач прогнозирования рудных месторождений трехмерная пространственная информация по своей сути содержит взаимосвязи местоположения минерализации, что делает трехмерные сверточные нейронные сети особенно выгодными для таких задач.

*Архитектура сети*, разработанная в этом исследовании, включает пять основных компонентов (рис. 3), входной слой, трехмерные сверточные слои (Conv), объединяющие слои, трехмерные транспонированные сверточные слои (TConv) и выходной слой. Среди них Conv, объединяющие слои и TConv в совокупности составляют скрытые слои многослойного перцептрона. Для решения задачи прогнозирования рудного месторождения сетевой выходной уровень модифицирован для вывода апостериорных вероятностей минерализации в виде двоичной классификации.

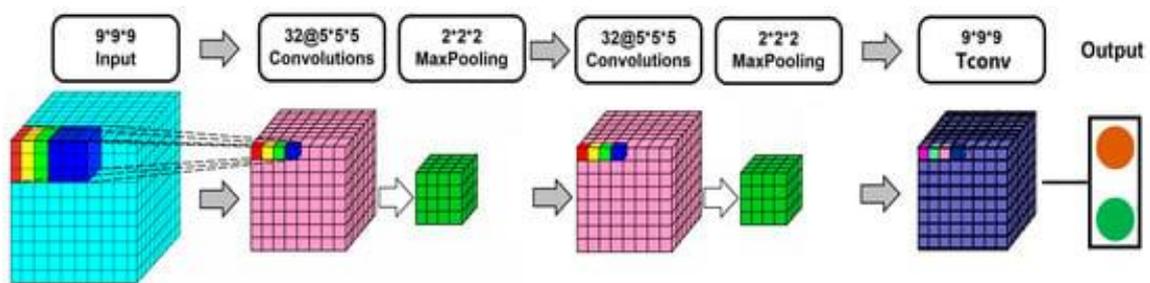


Рис. 3. Проектирование 3D сверточной нейронной сети.

#### 4. Набор данных и геологическое 3D-моделирование.

Перед созданием 3D-геологической модели золоторудного месторождения Заозигуоу был завершён сбор исторических геологических и геохимических данных, включая геологические отчеты, карты, геохимические данные, данные бурения и т.д. (табл. 2).

Табл. 2.

Данные о золоторудном месторождении Заозигуоу.

Category	Description
Geological map	Topographic-geological map with the scale of 1:2000
Horizontal section map	Horizontal section maps of elevations of 2450 m, 2530 m, 3610 m, 2850 m, 3010 m, 3050 m, 3090 m, and 3170 m
Geological profile	NE-orientation geological profiles of exploration lines of 54#, 58#, 62#, 66#, 70#, 74#, 78#, 81#, 89#, 93#, 96#, 98#, 100#, 102#, 106#, 110#, 114#, 118#, 120#, 128# NW-orientation geological profiles of exploration lines of 192#, 196#, 199#, 200#, 202#, 204#, 208#, 212#, 216#
Drilling log	N-S-orientation geological profiles of exploration lines of 283#, 287#, 291#, 292#, 295#, 298#, 302# 72 drillings
Geochemical data	5028 samples; 12 elements of Ag, As, Au, Cu, Hg, Pb, Zn, Sb, W, Bi, Co, and Mo

Начало трехмерного геологического моделирования инициируется критическим этапом стандартизации координат собранных данных. Последующий этап включает импорт стандартизированных данных в программную платформу Micromine, что знаменует начало процесса моделирования.

Данные по скважинам представляют собой наиболее прямой и точный источник глубинной геологической информации. В этом исследовании было собрано в общей сложности 157 наборов данных по скважинам. Импортируя данные о местоположении скважин, данные об отклонениях при бурении, записи отбора проб и литологические данные, строится комплексная модель скважины, как показано на рисунке 4.

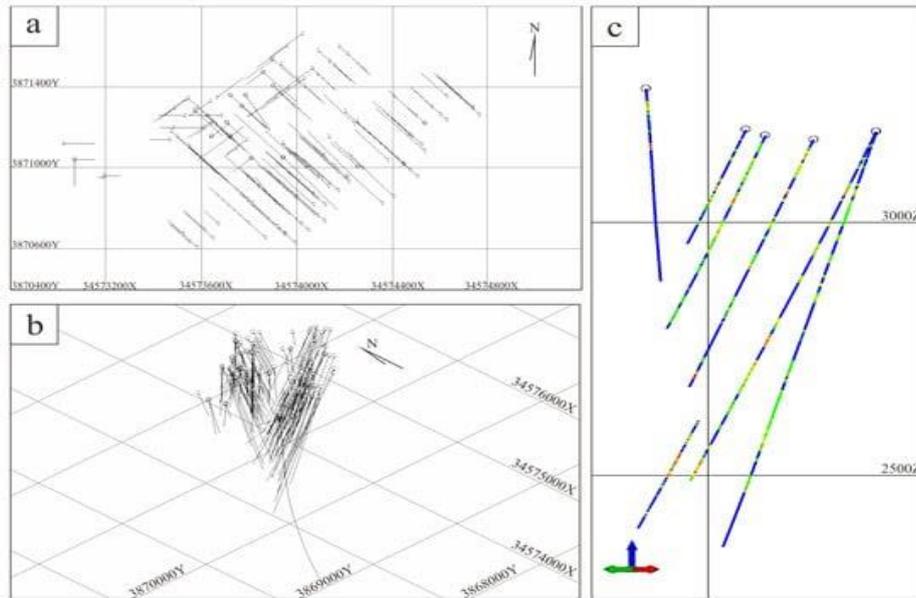


Рис. 4. 3D-модель бурения на золоторудном месторождении Заозигоу.  
(а) План распределения. (б) Вид сбоку. (с) Распределение качества керна

Впоследствии участок разведочной линии подвергся преобразованию координат, чтобы обеспечить согласование буровых скважин на разведочных разрезах с моделью буровой скважины. Этот процесс включал соединение геологических граничных линий, соответствующих смежным поперечным разрезам, что позволяло строить модели рудных тел, модели магматических пород и модели разломов.

Модель рудного тела точно отображает форму и положение. На золоторудном месторождении Заозигоу рудное тело имеет тенденцию к северо-востоку с крутым наклоном от  $50^\circ$  до  $70^\circ$ , а в некоторых локализованных участках оно даже вертикальное. Определенные сегменты крутопадающего рудного тела пересекаются и смещаются рудоконтролирующими разломами, связанными с пологопадающими рудными телами (рис. 5). Эта информация предоставляет ценный материал для отбора положительных проб при последующем прогнозировании руды.

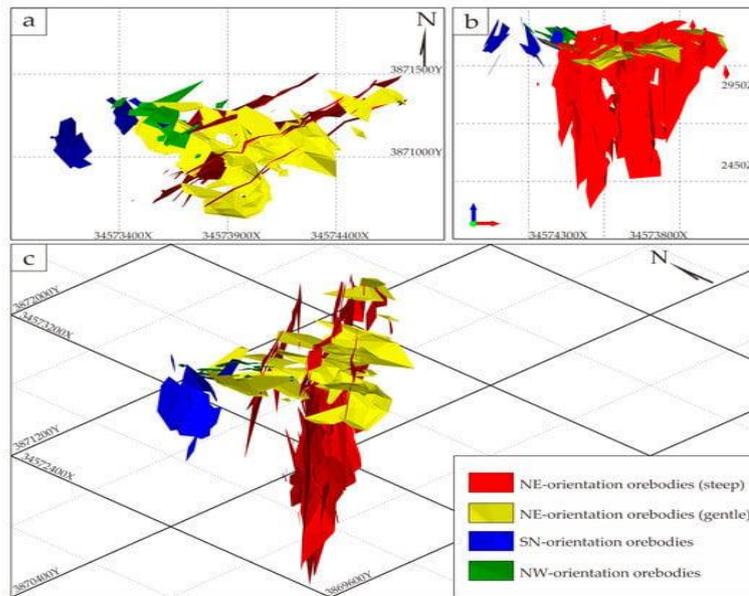


Рис. 5. 3D-модель м-ния Заозигоу. (а) Вид в плане. (b,c) Вид сбоку.

В процессе формирования месторождений разломы обычно играют ключевую роль, обеспечивая пути для магматических гидротермальных флюидов, способствуя обогащению ценными минералами. На золоторудном месторождении Заозигоу эти структуры можно разделить на пять основных групп: северо-западные, северо-южные, северо-восточные, почти восточно-западные и северо-северо-восточные. Посредством анализа взаимосвязей между рудными телами и этими структурами определили, что они оказывают наиболее значительное влияние на минерализацию в радиусе приблизительно 30 м. Поэтому очертили 30-метровую буферную зону вокруг этих разломов в качестве одного из элементов для последующего прогнозирования (рис. 6).

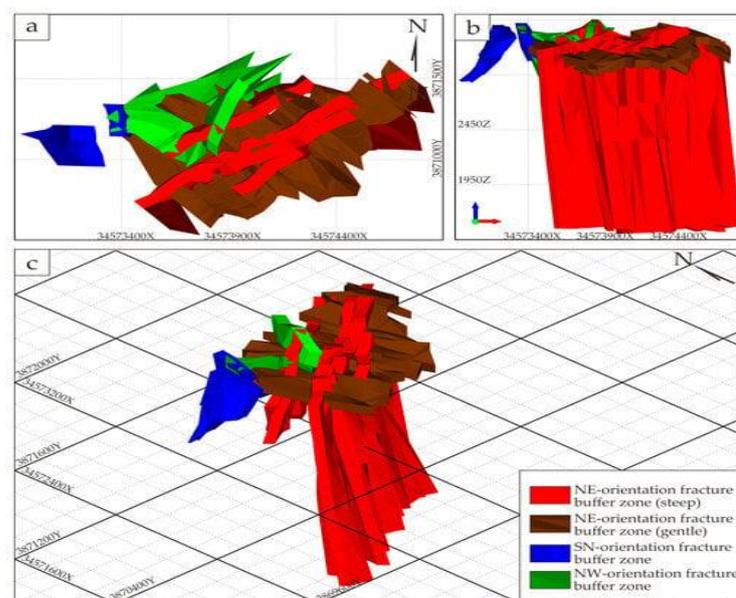


Рис. 6. 3D модель разломов. (а) Вид в плане. (b,c) Вид сбоку.

Месторождение Заозигоу характеризуется развитием различных горных пород, в основном состоящих из диорит-порфирита, гранит-диорит-порфирита и кварц-диорит-порфирита. Диорит-порфиритовые жилы относительно менее распространены и преимущественно обнажены на северо-западе, простираясь глубже к юго-востоку со значительными вариациями углов падения. В центральной части зоны гранит-диорит-порфиритовых жил ориентация северо-восточная, понижающаяся к юго-западу под углами, варьирующимися примерно от  $30^\circ$  до  $60^\circ$ . Кварцевые диорит-порфиритовые жилы сосредоточены и простираются вдоль северо-восточного направления с ориентацией от  $40^\circ$  до  $60^\circ$ . Минерализация тесно связана с жилами промежуточных пород, в частности кварц-диоритового порфирита (рис. 7).

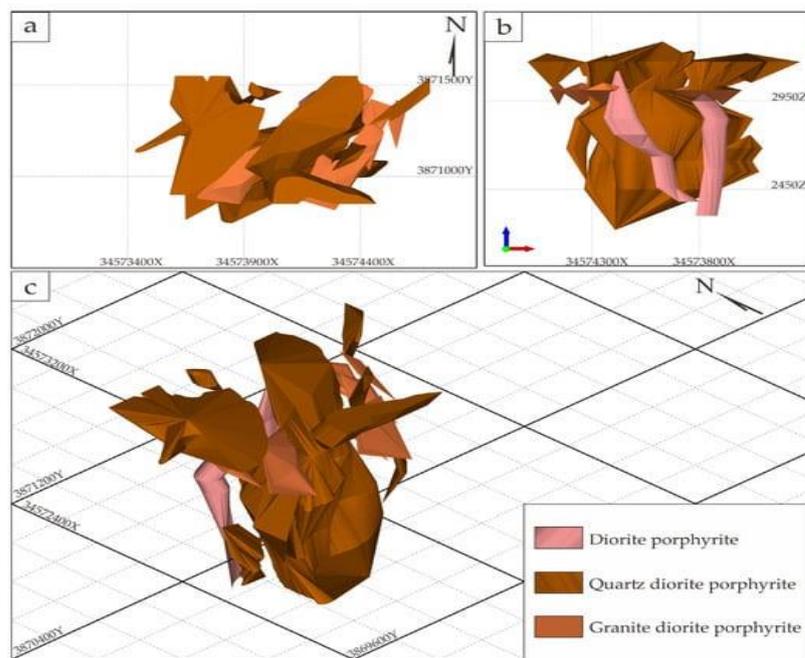


Рис. 7. Интрузивная 3D модель. (а) Вид в плане. (b,c) Вид сбоку.

### 5. Геохимическое 3D-моделирование.

Первичные данные о геохимических ореолах из кернов скважин включают: в общей сложности керн из 72 скважин (5028 проб) был проанализирован на 12 элементов Ag, As, Au, Cu, Hg, Pb, Zn, Sb, W, Bi, Co и Mo. Аналитическими методами были плазменная масс-спектрометрия, атомно-абсорбционная, эмиссионная спектрометрия, атомная флуоресценция и рентгенофлуоресцентная спектрометрия. Статистический анализ был проведен по первичным данным геохимического ореола (табл. 3).

Статистический анализ данных керн

Element	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard Deviation	Anomaly Threshold	K	CV
Au	0.15	202.53	11	35,300	1064.67	2331.87	238.27	5.26
As	0.5	639.1	95.6	25,140	1677.3	3993.6	145.25	2.62
Sb	0.05	391.12	21.4	130,300	4329.22	9049.57	1150.35	11.07
Hg	0	58	23	94,931	1397	2852	4.86	23.96
Cu	0.5	34.1	28.6	3418	67.4	168.8	2	1.98
Pb	0.8	22.8	20.3	381.8	16.6	56.1	1.2	0.73
Zn	1.9	71.3	74.1	317	34.8	140.8	1.05	0.49
Co	0.1	24.5	17.5	142.6	22.5	69.5	2.45	0.92
Ag	0.007	0.136	0.088	9.795	0.272	0.68	2.27	2
Mo	0.01	1.75	0.44	304.05	7.3	16.34	2.82	4.18
W	0.05	17.75	7.5	1639.75	51.48	120.71	18.3	2.9
Bi	0	1.29	0.46	337.5	7.49	16.27	7.14	5.83

Note: The units of Ag, Au, and Hg is  $10^{-9}$ ; the rest of the elements are in units of  $10^{-6}$ .

Коэффициенты обогащения элементами показаны на рисунке 8а. Коэффициенты обогащения Au, As и Sb превышали 100, а стандартные отклонения превышали 1000. Коэффициентами вариации (CV) (рис. 8b), превышающими 5, являются Au, Hg, Sb и Bi, что указывает на то, что их распределение в районе чрезвычайно неоднородно с большими колебаниями и более склонно к агрегации и потенциалу минерализации. Элементами с сильными коэффициентами вариации (больше 1 и меньше 5) являются Ag, As, Cu, Mo и W, что указывает на то, что они неравномерно распределены в пространстве и обладают некоторым потенциалом обогащения.

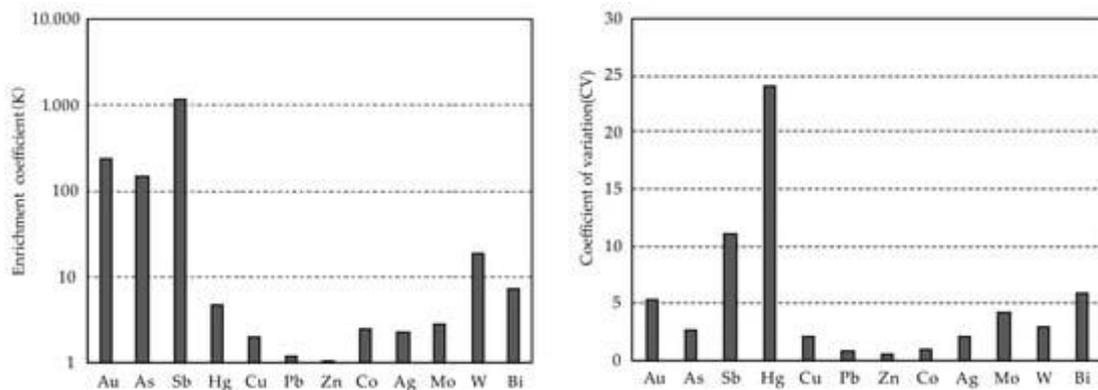


Рис. 8. Диаграмма коэффициента обогащения и коэффициента вариации

В целом, стандартные отклонения, коэффициенты обогащения и коэффициенты вариации для элементов Au и Sb характеризуются большими дисперсиями и высокими коэффициентами обогащения и степенями вариации.

#### Определение диапазона моделирования объема 3D-данных.

Метод прогнозирования, основанный на геохимии, обычно ограничен контролируемой шириной и глубиной бурения. В данном исследовании построена объемная модель данных первичного геохимического ореола 3D в пределах буфера трещиноватости 30 м, так что изолированное бурение на больших глубинах обеспечивает надежное пространство для прогнозирования.

Таким образом, на основе геологического фона, бурения и интервалов отбора проб размер куба был определен как  $10 \times 10 \times 10$  м для длины, ширины и высоты. Всего в диапазон моделирования было заполнено 314 788 кубов (рис. 9). Пространственно интерполированные кубы будут содержать геологические и геохимические данные, а также предполагаемую металлогеническую информацию, обеспечивая носитель 3D-визуализации для дальнейшего 3D-картирования перспективности.

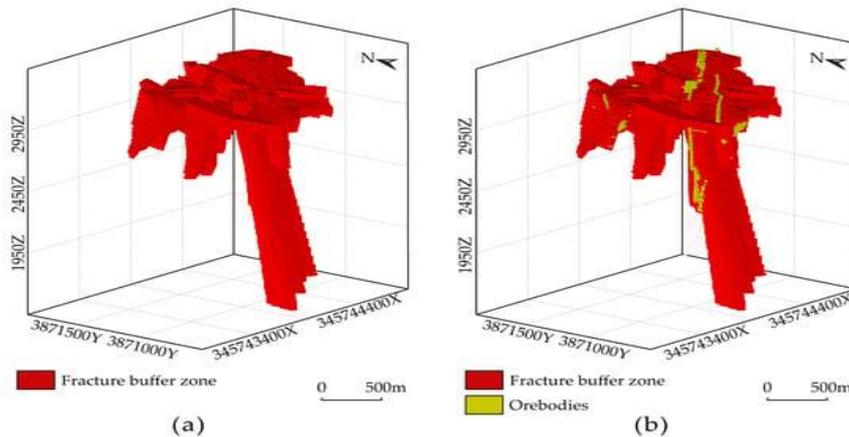


Рис. 9. Буферная зона на расстоянии 30 м от разлома м-ния Заозигоу.  
(а) Буферная зона. (б) Буферная зона с рудными телами.

*Метод пространственной интерполяции первичных данных геохимического ореола.*

В данном исследовании используется обычный метод интерполяции Кригинга для построения объемной модели первичного геохимического ореола.

Этапы пространственной интерполяции элементного состава в основном включают: (1) предварительную обработку данных, включая статистический анализ и нормализацию данных; (2) расчет и подгонку вариограммы, включая вычисление параметров вариограммы и использование сферической модели для подгонки вариограммы; и (3) интерполяцию 3D по Кригингу, включая установление 3D-эллипсоида пространственного поиска, вычисление матрицы коэффициентов и вектора расстояний, а также использование обычного метода Кригинга для получения пространственного результата интерполяции. Наконец, была получена объемная модель данных первичного геохимического ореола 3D, обеспечивающая геохимические доказательства для прогнозирования скрытого оруденения.

Пространственное распределение элементов в пределах м-ния Заозигоу является анизотропным, с четкой структурой обогащения в пределах разломов. Залегание рудных тел почти соответствует их залеганию. Поэтому интерполированная спецификация эллипсоида была определена путем объединения распределения разломов и рудных тел.

Предварительная обработка данных необходима для первичного анализа данных геохимического ореола, поскольку экстремальные значения могут сильно повлиять на

извлечение закономерностей распределения элементов. Принимая в качестве порогового значения трехкратное среднее значение, экстремальные значения заменяются пороговым значением. Во-вторых, определение ориентации основного и вторичного диапазонов имеет решающее значение для точности результатов интерполяции по Кригингу. Направление основной ориентации совпадает с ориентацией рудных тел, в то время как направление вторичной ориентации соответствует углам падения рудных тел. Вертикальная ориентация перпендикулярна плоскости, образованной основной и вторичной ориентацией (табл. 4; рис. 10).

Табл. 4.

Параметры экспериментальной вариограммы в различных ориентациях диапазона.

Orientation	Lag (m)	Angular Tolerance	Number of Point Pairs	Nugget	Cumulative Sill	Range (m)
Main orientation	10	22.5°	60	1.65	1.89	230
Secondary orientation	10	22.5°	60	2.26	1.87	220
Vertical orientation	10	22.5°	60	2.12	1.88	110

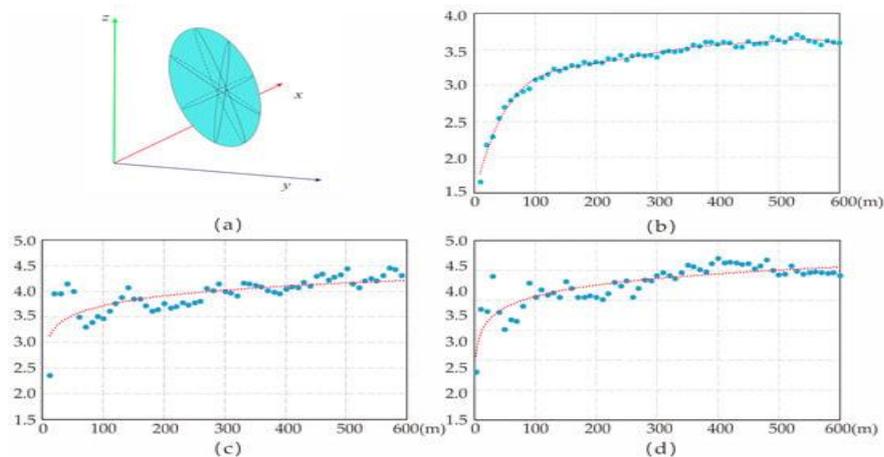


Рис. 10. Подгонка вариограммы и проектирование поискового эллипсоида.

- (a) Подгонка ориентации основного диапазона. (b) Подгонка ориентации вторичного диапазона.  
(c) Подгонка ориентации вертикального диапазона; (d) Поисковый эллипсоид.

*Трехмерная модель объема геохимических данных и закономерности пространственного распределения элементов.*

Результаты трехмерной пространственной интерполяции 12 элементов обеспечивают интуитивное представление структуры распределения элементов (рис. 11). Изменение значений содержания элементов в модели объема данных представлено 9-уровневыми цветами в соответствии с совокупной частотой натурального логарифма данных о содержании элементов (табл. 5).

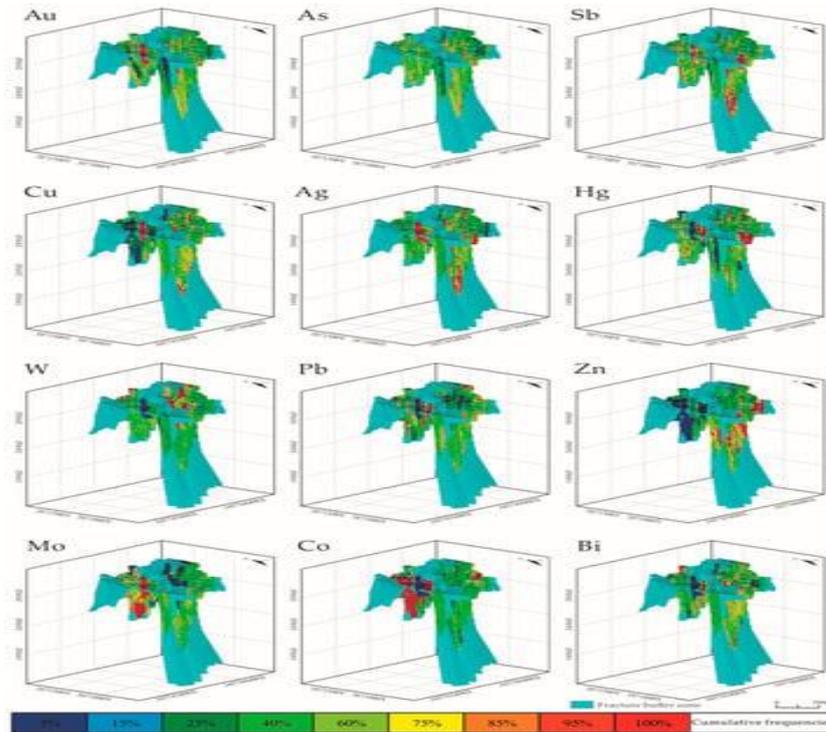


Рис. 11. 3D-геохимическая модель элементов.

Табл. 5.

Совокупная частота натурального логарифма данных о содержании элементов.

Element	Cumulative Frequency								
	5%	15%	25%	40%	60%	75%	85%	95%	100%
ln(Au)	-0.11	0.69	1.19	1.93	3.00	4.22	5.27	6.89	11.24
ln(As)	2.23	2.91	3.38	4.04	5.14	6.07	6.91	8.09	10.13
ln(Sb)	0.26	1.17	1.80	2.57	3.43	4.07	4.66	6.02	11.78
ln(Hg)	2.18	2.53	2.73	2.97	3.29	3.61	3.94	4.63	11.46
ln(Cu)	2.08	2.54	2.86	3.21	3.49	3.67	3.86	4.28	8.14
ln(Pb)	2.01	2.51	2.73	2.91	3.10	3.25	3.38	3.74	5.94
ln(Zn)	2.69	3.33	3.94	4.20	4.45	4.57	4.65	4.77	5.76
ln(Co)	2.07	2.32	2.53	2.75	2.91	3.03	3.35	4.42	4.96
ln(Ag)	-2.92	-2.76	-2.66	-2.54	-2.33	-2.12	-1.97	-1.05	2.28
ln(Mo)	-1.61	-1.61	-1.61	-1.11	-0.56	0.00	0.69	1.89	5.72
ln(W)	0.41	0.83	1.12	1.59	2.29	2.83	3.26	4.03	7.40
ln(Bi)	-2.18	-1.54	-1.22	-0.92	-0.63	-0.26	0.19	1.20	5.82

Анализ показывает, что индексы элементов Au, As и Sb постепенно увеличиваются от поверхности к глубине, и закономерности их изменения схожи. Это говорит о том, что эти элементы связаны с золотой минерализацией, и их способность к обогащению увеличивается с глубиной. Hg имеет две сильные аномалии на высотах 1700 м и 3200 м. В качестве низкотемпературного элемента, который легко рассеивается, Hg обычно появляется в верхней части рудного тела. Обогащение на глубине 3100 м отражает рудное тело ниже, в то время как обогащение на глубине 1700 м может указывать на потенциальные рудные тела в более глубоких местах. Аномалии Co и Mo обнаружены на высоте 2300 м, что указывает на хвост рудных тел. W и Bi имеют сходное распределение аномалий и отрицательную корреляцию с Au, As и Sb (рис. 11).

Основываясь на приведенном выше анализе и сравнивая пространственное распределение элементов с пространственным положением рудных тел, можно видеть, что ассоциацией элементов переднего ореола золоторудного м-ния Заозигоу является As-Sb-Hg; ассоциацией элементов околорудного ореола является Au-Ag-Cu-Pb-Zn; а ассоциацией элементов хвостового ореола является W-Mo-Bi.

## 6. Результаты и обсуждение.

Основываясь на модели геологического объекта и модели геохимического рудного тела, прогноз в первую очередь фокусируется на глубинном прогнозировании в районе, площадью 2,16 км<sup>2</sup>. Прогнозируемая глубина установлена в 3000 м ниже поверхности. Объем трехмерного прогноза проиллюстрирован на рисунке 12.

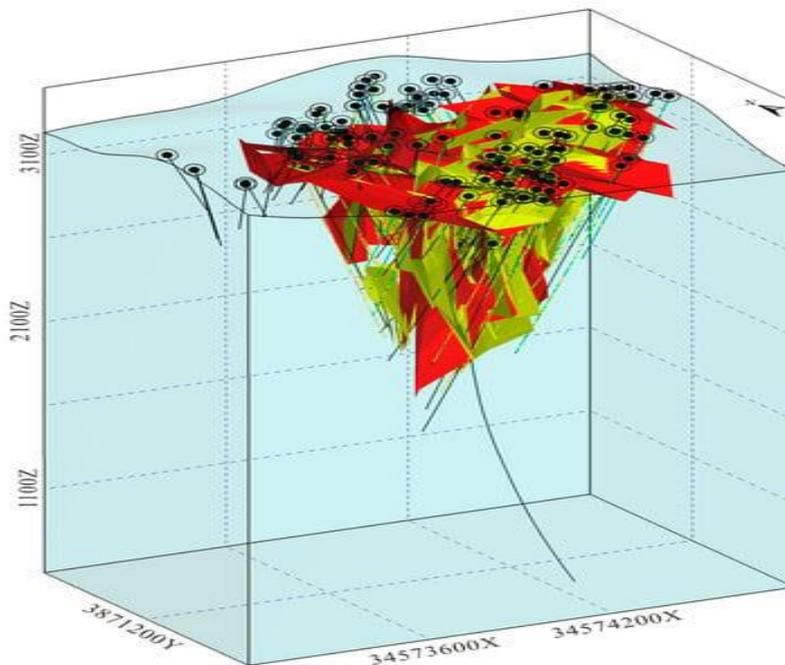


Рис. 12. Объем трехмерного прогнозирования.

Создание 3D-моделей поиска ПИ - это не только фундаментальный научный аспект, но и эффективный подход к выявлению скрытых рудных месторождений.

На м-нии Заозигоу на размещение рудных тел в первую очередь влияют разломы и жильные интрузии. Распределение, зональность и комбинации геохимических элементов служат благоприятными индикаторами для минерализации. Они могут выявить источники во время формирования рудного месторождения, процесс минерализации и среду минерализации, тем самым помогая в определении перспективных районов.

Трехмерный прогноз включает в себя установление количественных показателей благоприятных рудоуправляющих факторов (условий минерализации). Этот процесс в

сочетании со сплошными и блочными моделями облегчает получение трехмерных кубических представлений для различных благоприятных условий минерализации. В этом исследовании используется модель массива горных пород, модель структурной буферной зоны и комбинация геохимических элементов Au, As и Sb наряду с элементами из ближайшего ореола, а также геохимические параметры (отношение переднего ореола к дистальному) в качестве прогностических факторов минерализации. В общей сложности для прогноза минерализации используются семь переменных (трехмерная модель кварц-диоритового порфирита, модель 30-метровой структурной буферной зоны, Au, As и Sb, комбинация Au-Ag-Cu-Pb-Zn в околорудном ореоле, соотношение элементов переднего ореола к элементам хвостового ореола (As-Sb-Hg)/(W-Bi-Co-Mo)) (табл. 6).

Табл. 6.

Элементы прогноза.			
	Predictive Factors	Description of Variables	Variables
Geology	Magmatic rocks	Concealed intermediate acidic intrusion, quartz diorite (porphyrite), high potassium calcium alkaline series	The three-dimensional model of quartz diorite porphyrite
	Structures	Fault surface and fracture surface; lithologic interface	The 30 m structural buffer zone model
Geochemistry	Element Combinations	Au, As, and Sb combination; Au content is above $15 \times 10^{-9}$ , Sb content is above $30 \times 10^{-6}$ , which are direct geochemical indicators for gold exploration	Au, As, and Sb
	Primary Halo	As-Sb-Hg (front halo) → Au-Ag-Cu-Pb-Zn (near-ore halo) → W-Bi-Co-Mo (tail halo)	Au-Ag-Cu-Pb-Zn (As-Sb-Hg)/(W-Bi-Co-Mo)

До включения 3D-модели CNN семь переменных подверглись преобразованию в кубические представления (каждый маленький куб размером  $10 \times 10 \times 10$  м). Двоичное кодирование применялось независимо к модели массива горных пород и к модели структурной буферной зоны. В частности, если небольшой куб попадал в минерализованное горное тело или буферную зону разлома, он получал двоичное значение 1; и наоборот, если он находился за пределами этих областей, он получал двоичное значение 0. Геохимические параметры были легко интегрированы путем отнесения значений их содержания непосредственно к соответствующим маленьким кубикам. По сути, каждый маленький кубик инкапсулирует эти семь атрибутов, облегчая всесторонний прогноз минерализации.

Положительные пробы были отобраны из маленьких кубиков в рамках модели рудного тела. Отрицательные пробы были случайным образом отобраны в тех местах модели, где рудное тело отсутствовало, что соответствовало количеству положительных проб. Вместе эти положительные и отрицательные образцы сформировали учебный набор данных.

Сверточная нейронная сеть использует двоичную функцию кросс-энтропийных потерь для двоичной классификации, направленную на балансировку потерь между

положительными и отрицательными выборками при плавной настройке параметров сети. Оптимизатором выбран Adam со скоростью обучения 0,1 и стажировкой более 100 эпох. Результирующие потери в бинарной классификации и точность показаны на рисунке 13а.

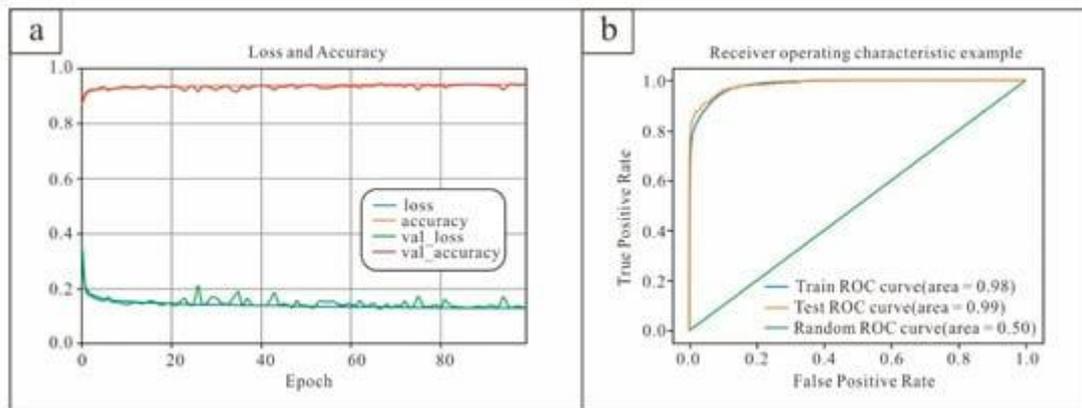


Рис. 13. (а) Потери и точность бинарной классификации в процессе обучения; (б) график кривой ROC.

Конфигурация параметров представлена в таблице 7, где количество каналов на “Входе” означает количество входных атрибутов, а количество каналов на “Выходе” представляет конечный результат прогноза, обозначающий достоверность присутствия минерализации. Функция активации сигмоида используется для ограничения выходных значений в пределах диапазона (0, 1), где значения, близкие к 1, указывают на более высокую достоверность присутствия оруденения, в то время как более низкие значения подразумевают меньшую достоверность.

Табл. 7.

Совокупная частота натурального логарифма данных о содержании элементов.

Architecture	Feature Maps	Kernel Size	Strides	Padding	Channels
Input	9, 9, 9				7
Conv_1	5, 5, 5	3, 3, 3	2, 2, 2	same	14
Conv_2	5, 5, 5	3, 3, 3	2, 2, 2	same	21
TConv_1	5, 5, 5	3, 3, 3	1, 1, 1	valid	14
TConv_2	9, 9, 9	3, 3, 3	2, 2, 2	same	7
Output	9, 9, 9	3, 3, 3	1, 1, 1	same	1

Кривые ROC, изображенные на рисунке 13b для обученной модели сверточной нейросети как в наборах данных для обучения, так и в наборах данных для проверки, показывают особенно надежное соответствие, превосходящее производительность моделей гауссовой смеси и моделей прогнозирования максимальной энтропии.

Построение сверточной нейросетевой модели, оценка точности с помощью обучения и кривые ROC обучающего и тестирующего наборов в совокупности подчеркивают точность и надежность модели. Визуальное представление трехмерного прогноза рудного

месторождения, как показано на рисунке 14, демонстрирует высокую вероятность глубинной минерализации, тем самым предполагая распространение минеральных тел в более глубокие слои и очерчивая две предполагаемые целевые области.

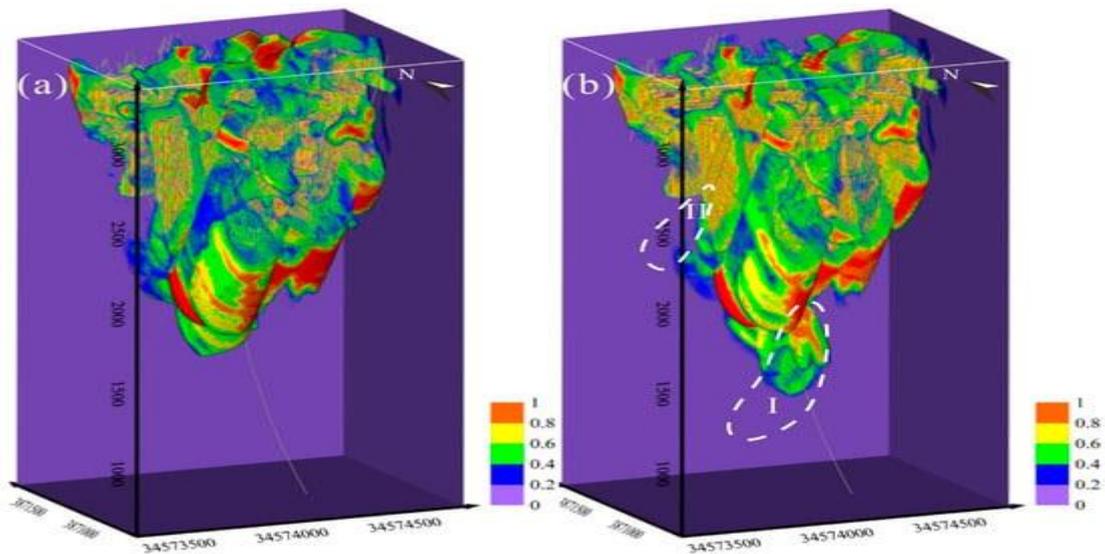


Рис. 14. Карта глубинного прогноза на основе CNN.

(a) Результаты без данных о глубинном бурении; (b) Результаты с данными CNN.

Сравнивая распределение рудных тел и разломов (рис. 5 и б), можно обнаружить тесную взаимосвязь между ними и областью высокой вероятности на рисунке 14.

Определены две целевые области. Цель I находится в юго-восточном направлении на глубине 1700-2000 м. Это положение представляет собой конец расширения рудного тела Au1. Примечательно, что элементы Au и Sb демонстрируют значительно сильные аномалии в этом месте. Соотношение элементов между передним и дистальным ореолами постоянно растет. Моделирование сверточной нейронной сети вычислило относительно высокую вероятность минерализации в этом месте. Следовательно, прогнозируется, что рудное тело Au1 распространится на глубину более 1800 м или даже даст начало новым рудным телам.

Объект II расположен в северо-западном направлении в диапазоне глубин 2350-2650 м. Этот участок демонстрирует более высокий уровень структурной сложности. Наблюдается заметное вертикальное перекрытие дистального элемента ореола Со с передними элементами ореола Sb и As. По сравнению с рудными телами в юго-восточном направлении, контроль над рудными телами на северо-западной стороне немного менее тщательный с точки зрения глубины. Однако более глубокое распространение рудного тела не было ограничено, особенно в отношении стабильных и мощных рудных тел, таких как Au9 и Au126. Геохимические параметры, начинающиеся с глубины 2600 м и глубже, предполагают потенциальное присутствие дальнейших расширений или даже новых слепых рудных тел.

## **7. Выводы.**

1. Интеграция 3D-геологического и геохимического моделирования в сочетании с инновацией алгоритма сверточной нейронной сети знаменует собой значительный шаг вперед в прогнозировании глубинного оруденения.

2. Во время этого процесса буфер трещиноватости в 30 м служит диапазоном 3D-моделирования металлогенического процесса, контролируемого разломной тектоникой на месторождении Заозигоу.

3. Одновременно разработка 3D-геохимических моделей позволила пролить свет на подповерхностное распределение важнейших минерализующих элементов. Распределение элементов и их ассоциаций в переднем ореоле, прирудном ореоле и хвостовом ореоле извлекаются в качестве важных прогнозных показателей, соответствующих металлогенической закономерности рудоформирования.

4. Использование сверточной нейронной сети помогает по-новому взглянуть на глубинную минерализацию, и цели прогноза, предлагаемые этим методом, заслуживают большего внимания.

В целом, эти достижения способствуют не только научному пониманию процессов минерализации, но и практическим стратегиям поисков и разведки, используемым для раскрытия скрытых рудных ресурсов.

## ИСТОЧНИКИ:

1. Cheng Li, Bingli Liu, Keyan Xiao, Yunhui Kong, Lu Wang, Rui Tang, Miao Xie and Yixiao Wu. «METALLOGENIC PREDICTION OF THE ZAOZIGOU GOLD DEPOSIT USING 3D GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL MODELING». *Minerals* 2023.
2. Daniel Bombardieri, Mark Duffett, Andrew McNeill, Matthew Cracknell and Anya Reading. «INSIGHTS AND LESSONS FROM 3D GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL MODELING OF MINERALIZED TERRANES IN TASMANIA». *Minerals* 2021.
3. Guang Qi, Guixiang Meng, Jiayong Yan, Hejun Tang and Ronghui Xue. «THREE-DIMENSIONAL GEOLOGICAL–GEOPHYSICAL MODELING AND PROSPECTING INDICATIONS OF THE ASHELE ORE CONCENTRATION AREA IN XINJIANG BASED ON IRREGULAR SECTIONS». *Minerals* 2023.
4. Jan von Harten, Miguel de la Varga, Michael Hillier and Florian Wellmann. «INFORMED LOCAL SMOOTHING IN 3D IMPLICIT GEOLOGICAL MODELING». *Minerals* 2021.
5. Sérgio Roberto Bacelar Hühn, Adalene Moreira Silva, Francisco José Fonseca Ferreira and Carla Braitenberg. «MAPPING NEW IOCG MINERAL SYSTEMS IN BRAZIL THE VALE DO CURAÇÁ AND RIACHO DO PONTAL COPPER DISTRICTS». *Minerals* 2020, 10.
6. Yun Bai, Chunying Guo, Pengfei Zhu, Jianji Tian and Zilan He. «THREE-DIMENSIONAL PREDICTION AND EVALUATION OF BAIYANGHE URANIUM DEPOSIT IN THE XUEMISTAN VOLCANIC BELT, XINJIANG». *Minerals* 2023.
7. Zhaolong Xue, Song Wu, Miao Li and Kaiwang Cheng. «A NOVEL METHOD FOR REGIONAL PROSPECTING BASED ON MODERN 3D GRAPHICS». *Minerals* 2024.
8. Zhaopeng Li, Deyun Zhong, Zhaohao Wu, Liguan Wang and Qiwang Tang. «LOCAL DYNAMIC UPDATING METHOD OF OREBODY MODEL BASED ON MESH RECONSTRUCTION AND MESH DEFORMATION». *Minerals* 2021.