



**ФГБУ «ВИМС»**

*ЗАРУБЕЖНЫЕ ИНТЕРНЕТ-МАТЕРИАЛЫ*

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ДР. ТЕХНОЛОГИИ,  
МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ  
ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**  
*(преимущественно «скрытого» типа)*

**№ 18**

*Редактор-составитель: В.В. Коротков*

## СОДЕРЖАНИЕ:

|  | стр. |
|--|------|
| <b>I. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В РАСТЕНИЯХ И ИХ РОЛЬ В ВЫЯВЛЕНИИ «СКРЫТОГО» ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОРУДЕНЕНИЯ (м-ние Шизуюань, Провинция Хунань, Китай)</b> ..... | 6    |
| 1. Введение.....   | 6    |
| 2. Материалы и методы.....   | 7    |
| 3. Результаты.....   | 10   |
| 3.1. Характеристики микроэлементов в растениях.....  | 10   |
| 3.1.1. Оптимальное положение для отбора проб для различных растений.....   | 10   |
| 3.1.2. Особенности поглощения микроэлементов из почвы различными растениями.....   | 11   |
| 3.1.3. Индикаторные характеристики микроэлементов различных растений.....  | 12   |
| 3.1.4. Статистика геохимических параметров растений-индикаторов.....   | 14   |
| 3.2. Многомерный статистический анализ.....  | 15   |
| 3.2.1. Кластерный анализ R-типа.....   | 15   |
| 3.2.2. Факторный анализ.....   | 16   |
| 4. Обсуждение.....   | 17   |
| 4.1. Факторы, влияющие на содержание микроэлементов в растениях.....   | 17   |
| 4.2. Проверка результатов на основе минерализации и геологических данных.....  | 18   |
| 4.3. Ограничения и перспективы на будущее.....   | 18   |
| 5. Выводы.....   | 19   |
| <b>II. РЕСУРСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: РАЗРАБОТКА СЦЕНАРИЕВ ПОИСКОВ, РАЗВЕДКИ И ОСВОЕНИЯ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ М-НИЙ (район Сан-Антонио-Потрерильос, Чили)</b> .....                         | 21   |
| 1. Введение.....   | 21   |
| 2. Методология.....  | 23   |
| 2.1. Общие положения.....  | 23   |
| 2.2. Инструменты.....  | 24   |
| 2.3. Применяемые методы.....   | 30   |
| 3. Исследование медно-порфировой системы Сан-Антонио-Потрерильос.....  | 33   |
| 3.1. Расположение и геологическое описание.....  | 33   |
| 3.2. Доступные данные.....   | 35   |
| 3.3. Оценка геологической модели.....  | 37   |
| 3.4. Сценарии геологической модели.....  | 40   |
| 3.5. Оценки и сценарии для модели Grades.....  | 42   |
| 3.6. Геометрическая классификация и рекомендации по бурению.....   | 45   |
| 3.7. Результаты и рекомендации.....  | 46   |
| 4. Выводы.....   | 49   |
| 5. Мирозрение.....   | 51   |

|  |    |
|--|----|
| III. ДДЗ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ХРОМИТСОДЕРЖАЩИХ ЗОН В<br>ОФИОЛИТАХ ( <i>труднодоступные горные массивы Северного Омана</i> ).....                   | 52 |
| 1. Введение.....   | 52 |
| 2. Геология района.....  | 53 |
| 3. ДДЗ.....  | 54 |
| 4. Спектральные характеристики офиолитов и хромитов.....   | 55 |
| 5. Методология.....  | 56 |
| 6. Результаты и обсуждение.....  | 58 |
| 6.1. Картирование офиолитов и хромитовых минерализованных зон...   | 58 |
| 6.2. Полевая интерпретация.....  | 62 |
| 7. Выводы.....   | 64 |
| IV. АЛГОРИТМ DEEP ISOLATION FOREST (DIF) ДЛЯ<br>ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕДНО-ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ<br>( <i>провинция Хорасан-Резави, Иран</i> )..... | 65 |
| 1. Введение.....   | 65 |
| 2. Геология исследуемого района.....   | 67 |
| 3. Концептуальная модель.....  | 68 |
| 4. Материалы и методы.....   | 69 |
| 4.1. Геохимический отбор проб регионального масштаба.....  | 69 |
| 4.2. ДДЗ предварительная обработка.....  | 70 |
| 4.3. Геологические данные.....   | 70 |
| 5. Методология исследования.....   | 71 |
| 5.1. Логистическая функция.....  | 71 |
| 5.2. Изолирующий лес.....  | 72 |
| 5.3. Лес глубокой изоляции.....  | 73 |
| 6. Создание непрерывных слоев доказательств.....   | 74 |
| 6.1. Слои геохимических свидетельств.....  | 74 |
| 6.2. Близость к зонам гидротермальных изменений.....   | 75 |
| 6.3. Близость к интрузивным породам.....   | 77 |
| 6.4. Близость к пересечению разломов.....  | 77 |
| 7. Результаты и анализ.....  | 78 |
| 7.1. Оптимизация неконтролируемых алгоритмов обнаружения<br>аномалий.....  | 78 |
| 7.2. Интеграция непрерывных слоев данных.....  | 79 |
| 7.2.1. Модель перспективности iForest.....   | 79 |
| 7.2.2. Модель перспективности Deep Isolation Forest.....   | 80 |
| 8. Обсуждение.....   | 82 |
| 9. Выводы.....   | 84 |
| V. СВЕРХВЫСОКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ КАРТ С<br>ПОМОЩЬЮ U-ОБРАЗНОЙ СЕТИ В ПРОГНОЗНЫХ И ПОИСКОВЫХ<br>ЦЕЛЯХ ( <i>Китай</i> ).....             | 86 |
| 1. Введение.....   | 86 |
| 2. Геологические условия.....  | 88 |
| 3. Методы.....   | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.1. Пробоотбор, подготовка образцов и методы анализа.....  | 89  |
| 3.2. Ограничения и объединение нескольких наборов данных.....   | 92  |
| 3.3. Разделение данных.....   | 93  |
| 3.4. Многоуровневая U-образная сеть.....  | 94  |
| 3.5. Рабочий процесс.....   | 99  |
| 4. Результаты и обсуждение.....   | 100 |
| 4.1. Два набора данных для геохимического картирования плотности.....   | 100 |
| 4.2. Геохимические закономерности при разной плотности отбора проб.....   | 103 |
| 4.3. Результаты внедрения геологической карты.....  | 104 |
| 4.4. Эксперименты.....  | 105 |
| 4.5. Реконструкция геохимической карты.....   | 107 |
| 5. Выводы.....  | 112 |
| <br>  |     |
| VI. ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ VTEM ПРИ ПОИСКАХ М-НИЙ VMS ( <i>м-ние Touro Copper, СЗ Испании</i> ).....      | 113 |
| 1. Введение.....  | 113 |
| 2. Геологические условия.....   | 113 |
| 3. Методология VTEM.....  | 114 |
| 4. Сравнение измеренных данных VTEM с геологическими разрезами... ..  | 115 |
| 5. Моделирование.....   | 119 |
| 6. Выводы.....  | 121 |
| <br>  |     |
| VII. ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МИНЕРАЛОГИИ В ПОИСКОВЫХ ЦЕЛЯХ ( <i>медно-порфировой район Хайленд-Вэлли, Канада</i> ) | 123 |
| 1. Введение.....  | 123 |
| 2. Региональная геология.....   | 124 |
| 3. Геология месторождения.....  | 126 |
| 4. Методы.....  | 127 |
| 4.1. Набор образцов.....  | 127 |
| 4.2. Сбор гиперспектральных данных.....   | 127 |
| 4.3. Спектральный анализ данных.....  | 128 |
| 4.4. Идентификация минералов.....   | 128 |
| 4.5. Оценка толщины белой слюды.....  | 131 |
| 4.6. Оценка относительного модального содержания минералов.....   | 133 |
| 4.7. Оценка изменений для обнаружения минерализованных образцов.....  | 134 |
| 5. Результаты.....  | 135 |
| 5.1. Вариабельность масштаба выборки в фациях Вифсаида и Скина..  | 135 |
| 5.2. Вариабельность масштаба выборки в вифлеемской и других фациях.....   | 137 |
| 5.3. Химический состав минералов эпидота.....   | 138 |
| 5.4. Оценка изменений и обнаружение минерализованных образцов... ..   | 139 |
| 5.5. Минералогические закономерности в масштабах керна.....   | 141 |
| 5.6. Минералогические закономерности регионального масштаба.....  | 143 |
| 5.7. Вариабельность в региональном масштабе для объектов с 2200 нм.....   | 144 |
| 6. Обсуждение.....  | 146 |
| 6.1. Минералогическая изменчивость в районе долины Хайленд.....   | 146 |
| 6.2. Оценка изменения спектра и последствия.....  | 147 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.3. Прожилки кварца и изменения в непрерывном керне.....   | 149 |
| 6.4. Вмешательство в оценку химического состава белой слюды.....  | 149 |
| 7. Выводы.....  | 151 |
| <b>VIII. ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРО-ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРАНОВЫХ М-НИЙ (регион Циньлин, Китай).....</b> |     |
| 1. Введение.....  | 153 |
| 2. Геологический обзор исследуемой территории.....  | 153 |
| 3. Измерение уровня гамма-излучения.....  | 155 |
| 4. Метод извлечения слабой информации из данных аэрогамма-спектрометрии.....  | 156 |
| 5. Анализ данных аэрогамма-спектрометрии в районе исследования.....   | 157 |
| 5.1. Общие характеристики аэрогамма-спектрометрии.....  | 157 |
| 5.2. Параметры соотношения радиоактивных элементов.....   | 159 |
| 5.3. Характеристики многоэлементных комбинаций в ключевых областях.....   | 161 |
| 5.4. Прогноз перспективных участков урановой минерализации.....   | 165 |
| 6. Выводы.....  | 166 |
| <i>ИСТОЧНИКИ:</i> .....   | 168 |

# I. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В РАСТЕНИЯХ И ИХ РОЛЬ В ВЫЯВЛЕНИИ «СКРЫТОГО» ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОРУДЕНЕНИЯ (м-ние Шичжюань, Провинция Хунань, Китай) [2].

## 1. Введение.

В Шичжюане, расположенном на северной окраине центральной части широтной тектонической зоны Наньлин в провинции Хунань, находится всемирно известное м-ние вольфрама, олова, молибдена и висмута, которое характеризуется развитыми складчатыми и разрывными структурами и является важнейшим компонентом Наньлинского металлогенического пояса. На сегодняшний день в ходе ГРП в этом регионе были в основном изучены поверхностные и приповерхностные м-ния, что обосновывает необходимость поисков «скрытых» месторождений. Однако из-за густой растительности, значительного четвертичного покрова и ограниченного количества обнажений горных пород в этом регионе трудно получить достоверные результаты с помощью традиционных поисковых методов.

Традиционные поисковые геохимические методы часто не позволяют эффективно обнаруживать глубоко залегающие руды, в то время как фитогеохимические методы обладают явными преимуществами. Корни растений могут проникать в толщу горных пород, поглощая воду, питательные вещества и минеральные элементы из глубоких недр, тем самым создавая геохимические аномальные сигналы, которые дают ценную информацию о скрытых рудных телах. Таким образом, фитогеохимические методы представляют собой потенциально эффективный подход, который уже успешно применяется для поиска скрытых месторождений в различных странах и регионах, демонстрируя свои уникальные преимущества.

Многочисленные исследования подтвердили, что некоторые растения, произрастающие в рудных районах, демонстрируют геохимические аномалии микроэлементов, соответствующие скрытым рудным месторождениям.

В рудном районе Шичжюань провинции Хунань не проводилось систематических исследований для оценки эффективности фитогеохимических методов для поисков глубоко залегающих рудных тел. Цель данного исследования - возможность использования местных доминирующих растений в качестве индикаторов для ГРП. Были выбраны три доминирующих вида растений (*Artemisia argyi*, *Maesa japonica* и *Dicranopteris dichotoma*) для анализа их характеристик поглощения и обогащения микроэлементами в различных органах растений. Для оценки эффективности этих растений в качестве индикаторов для обнаружения руд использовались многомерные статистические методы, включая кластерный анализ R-типа и факторный анализ.

Цель исследования - предложить новые подходы для поисков «скрытых» м-ний в Шичжюань и подобных регионах.

## 2. Материалы и методы

### Геология исследуемого района.

М-ние Шичжюань расположено в 15 км к юго-востоку от города Чэньчжоу, провинция Хунань. Поверхностные слои м-ния Шичжюань преимущественно состоят из карбонатных пород верхнего девона, синайских метаморфических обломочных отложений и ограниченных четвертичных отложений в северной части района. Многочисленные разломы, простирающиеся с северо-востока на северо-северо-восток и с северо-востока на юго-восток, определяют распределение гранитов и скарнов. Гранитный плутон Цяньлишань, занимающий площадь около 10 км<sup>2</sup>, играет доминирующую роль в рудной минерализации. Проявления W–Sn–Bi–Mo типа скарнов и грейзенов преимущественно встречаются в контактовых зонах с гранитом, а проявления Cu, Pb, Zn и Ag гидротермального типа - на удалении от гранитоидов (рис. 1).

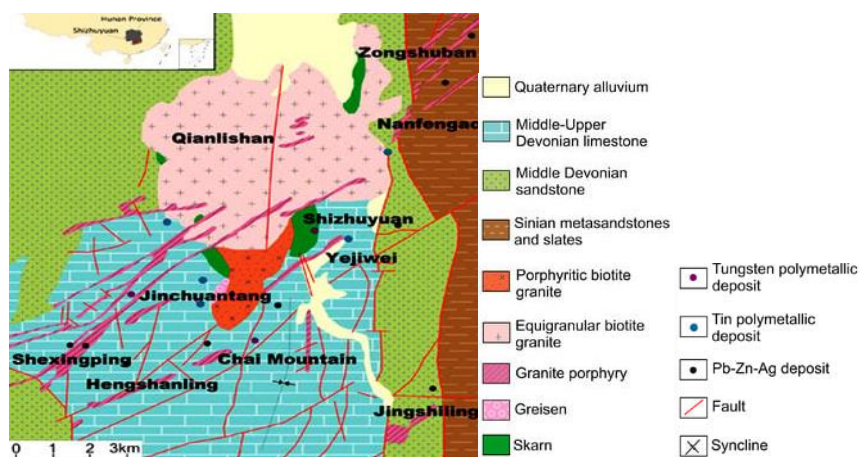


Рис. 1. Геологическая карта района Шичжуйюань.

Почва на территории исследования красноватого цвета с уровнем рН от 4,6 до 6,8. Растительный покров закрывает 95% площади, в основном за счёт семейства *сложноцветных*, за которым следует семейство *папоротниковых*. К основным местным видам растений относятся *попынь Арги*, *дикраноптерис двувильчатый*, *китодон двупалый*, *сосна Массона* и *маэса японская*. Доказано, что *A. Argyi* и *D. Dichotoma* обладают высокой способностью поглощать и накапливать тяжёлые металлы. Кроме того, *M. Japonica* широко распространена и имеет глубокую корневую систему. Эти три вида были выбраны в первую очередь для отбора проб.

### Сбор и подготовка проб.

Точки отбора проб растений располагались на расстоянии 20 м друг от друга, и в каждой точке было собрано примерно по 300 г образцов. Всего было собрано 126 образцов с 28 участков, охватывающих площадь около 10 км<sup>2</sup>. Это включало одновременный сбор образцов стеблей и листьев *M. japonica*, *A. Argyi* и *D. Dichotoma* в 8 местах, а также только образцов листьев этих трёх видов в ещё 20 местах. Двадцать четыре контрольных образца соответствующих растений были случайным образом собраны в отдалённом от рудных участков месте, свободном от искусственного загрязнения. Образцы промыли 3–5 раз ультрачистой водой, затем высушили при температуре 60°C. После этого их измельчили до размера частиц 0,2 мм.

### Анализ образцов.

Перед количественным анализом образцы обрабатывались методом мокрого разложения с использованием HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>. Примерно 0,2 г образца взвешивали в стакане на 50 мл и добавляли 10 мл смешанной кислоты (V(HNO<sub>3</sub>):V(HClO<sub>4</sub>) = 4:1). Колбу накрыли часовым стеклом и оставили на 30 минут, а затем поставили на горячую плиту при температуре 175°C для переваривания до тех пор, пока не пойдёт большое количество белого дыма, а переваренная масса не станет прозрачной и бесцветной. После полного переваривания раствор нагревали для выпаривания кислоты до тех пор, пока в колбе не осталось 1–2 мл жидкости, а затем переваренной массе давали остыть до комнатной температуры. Затем дигестат переливали в мерную колбу на 25 мл, разбавляли до нужного объёма, тщательно перемешивали и оставляли на некоторое время перед анализом. Все реагенты, использованные в эксперименте, были гарантированного качества (GR). Образцы, собранные в ходе исследования, были проанализированы в Государственной ключевой лаборатории изотопной геохимии Института геохимии Гуанчжоу Китайской академии наук. Среди изученных микроэлементов были Ag, As, B, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Th, Tl, U и Zn. Содержание каждого элемента указано в соотношении массы элемента к сухой массе растения (мкг/г). Анализ проводился с помощью масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) (Thermo X Series, Уолтем, Массачусетс, США).

### Контроль и оценка качества.

В процессе контроля качества анализа случайным образом были добавлены четыре национальных стандартных образца растений и четыре дубликата образцов. Контроль качества проводился в соответствии с требованиями к геохимическому анализу.

Точность проверялась с использованием формулы  $\Delta \lg C_j - \Delta \lg C_s \leq \pm 0,13 \Delta \lg C_j - \Delta \lg C_s \leq \pm 0,13$ , где  $C_j$  и  $C_s$  представляют собой среднее значение  $n$  измерений и стандартное значение

национального эталонного образца соответственно. Относительное отклонение массовой доли элемента при двух анализах одного и того же образца должно соответствовать стандарту  $RD \leq 20\%$ .

Результаты проверки качества показали, что контрольные образцы соответствуют критериям предварительного тестирования, а относительное отклонение (RD) при повторных измерениях одного и того же образца составляет от 0,2% до 3,5%, что соответствует стандарту  $RD \leq 20\%$  и указывает на достоверность результатов тестирования.

#### Анализ данных

(1) Нормализованные значения (Z) концентрации микроэлементов в тканях стебля и листьев растений рассчитывались по следующей формуле:

$$Z = \frac{\omega_{stem/leaf}}{\omega_{stem} + \omega_{leaf}} \quad 1$$

где  $\omega_{стебель/лист}$  обозначает среднюю концентрацию элемента в образце стебля или листа растения.

(2) Коэффициент контрастности ( $K_{CD}$ ), коэффициент обогащения ( $K_{NJ}$ ) и коэффициент изменчивости ( $C_v$ ) для микроэлементов в данных о растениях рассчитывались по следующим уравнениям:

$$K_{CD} = \frac{\omega_o}{\omega_b} \quad 2$$

$$K_{NJ} = \frac{\omega_o}{\omega_g} \quad 3$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\omega_o} \quad 4$$

где  $\omega_o$  — средняя концентрация элемента в образце растения,  $\omega_b$  — средняя концентрация элемента в образцах растений из контрольной зоны,  $\sigma$  — стандартное отклонение, а  $\omega_g$  — глобальное контрольное значение концентрации элементов в растениях.

(3) Коэффициент биологического поглощения ( $X_{BAC}$ ) для поглощения каждым элементом из почвы был выражен следующей формулой:

$$X_{BAC} = \frac{\omega_{plant}}{\omega_{soil}} \quad (5)$$

где  $\omega_{растение}$  обозначает концентрацию элемента в растении, а  $\omega_{почва}$  — концентрацию элемента в активной части почвы.

(4) Кластерный и факторный анализ 21 микроэлемента типа R позволил получить спектрограммы и матрицы ортогональных повернутых факторных нагрузок.

### 3. Результаты.

#### 3.1. Характеристики микроэлементов в растениях.

##### 3.1.1. Оптимальное положение для отбора проб для различных растений.

Элементы, поглощаемые растением, как активно, так и пассивно из окружающей среды, мигрируют и накапливаются в различных органах. Из-за различий в активности элементов, способности к миграции и способности к накоплению в конкретных органах распределение одного и того же элемента в разных органах растения различается. При фитогеохимическом исследовании определение оптимального места отбора проб имеет решающее значение для повышения точности и эффективности поиска минералов. Таким образом, были проанализированы средняя концентрация ( $\omega_o$ ) и коэффициент контрастности ( $K_{CD}$ ) микроэлементов в тканях стебля и листьев *A. argyi*, *M. Japonica* и *D. Dichotoma* из восьми точек на территории исследования. Учитывая значительные колебания концентрации 21 элемента, для построения графиков в программе Origin 2022 потребовалась нормализация средних значений микроэлементов.

У *A. Argyi* значения  $\omega_o$  18 микроэлементов, за исключением Cd, Tl и Zn, были заметно выше в тканях листьев. У *M. Japonica* в тканях листьев значения  $\omega_o$  Ag, As, B, Bi, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Sb, Se, Sn, Th, Tl и Zn были сравнительно выше, чем в тканях стебля. Аналогичным образом, в *D. Dichotoma* в тканях листьев были обнаружены более высокие значения  $\omega_o$  для Ag, As, B и 19 других микроэлементов (рис. 2).

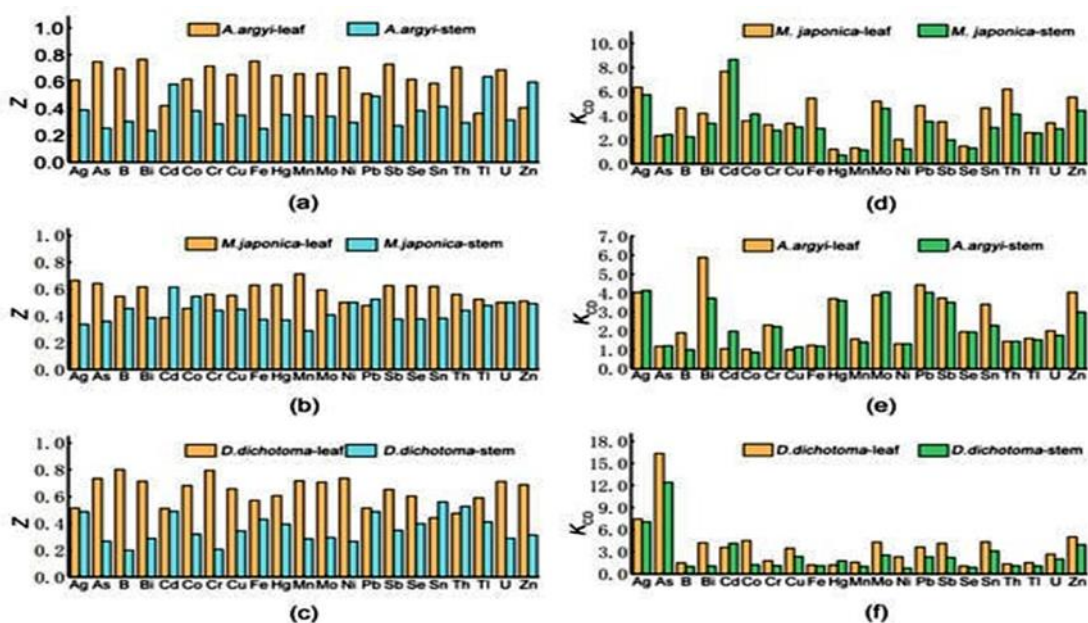


Рис. 2 Нормализованные значения ( $Z$ ) микроэлементов в стеблевых и листовых органах *Artemisia argyi* (a), *Maesa japonica* (b) и *Dicranopteris dichotoma* (c) и коэффициенты контрастности отклонений ( $K_{CD}$ ) микроэлементов в стеблевых и листовых органах *Artemisia argyi* (d), *Maesa japonica* (e) и *Dicranopteris dichotoma* (f).

Это говорит о том, что большинство микроэлементов преимущественно накапливаются в тканях листьев этих трёх растений. Хотя процентное содержание элементов в разных органах в некоторой степени влияет на результаты анализа, более высокий процент не обязательно означает, что растение подходит для отбора проб. Кроме того, для определения оптимальных частей растения, пригодных для отбора проб, необходимо учитывать значение аномалий содержания элементов в тканях.

По сравнению с тканями стебля, в тканях листьев *A. argyi*, *M. Japonica* и *D. Dichotoma* были обнаружены повышенные значения  $K_{CD}$  для 18, 15 и 18 микроэлементов соответственно. Это говорит о том, что большинство микроэлементов в листьях этих растений с большей вероятностью образуют отчётливые геохимические аномалии. Таким образом, листовые ткани *A. argyi*, *M. Japonica* и *D. Dichotoma* обладают выраженной способностью не только накапливать микроэлементы, но и создавать отчётливые геохимические аномалии, что делает их перспективными для индикации. Учитывая удобство и эффективность сбора образцов, листовые ткани считаются оптимальным материалом для изучения геохимических особенностей местных растений.

### 3.1.2. Особенности поглощения микроэлементов из почвы различными растениями.

При фитогеохимических поисках крайне важно выбирать растения с высокой способностью к обогащению целевыми элементами, поскольку такие растения, как правило, демонстрируют ярко выраженный контраст, эффективно выявляя аномалии по сравнению с фоновыми уровнями. Коэффициент биологического поглощения ( $X_{BAC}$ ) определяется как отношение концентрации элемента в листьях к его концентрации в почве, что указывает на степень миграции элемента из почвы в растение. Этот коэффициент отражает способность или склонность растения поглощать и накапливать определённые элементы. В процессе роста растения в первую очередь поглощают и используют элементы из почвы в их биодоступных формах. Таким образом, коэффициент поглощения растением, рассчитанный с использованием биодоступных фракций элементов в почве, отражает способность или тенденцию растения более эффективно поглощать и накапливать определённые элементы. Значение  $X_{BAC}$  для микроэлементов в растениях было рассчитано с использованием данных о фракционировании почвы, собранных и протестированных в том же месте, результаты представлены в таблице 1.

Значения  $X_{\text{ВАС}}$  микроэлементов в различных растениях в районе Шичжюань.

| Element | Plants<br>(N = 20)  | $X_{\text{ВАС}}$  | $\sigma$ | Element | Plants<br>(N = 20)  | $X_{\text{ВАС}}$   | $\sigma$ |
|---------|---------------------|-------------------|----------|---------|---------------------|--------------------|----------|
| Ni      | <i>A. argyi</i>     | 1.8~39.7 (11.9) * | 15.8     | Sb      | <i>A. argyi</i>     | 0.4~138.1 (18.1)   | 45.9     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 1.1~38.3 (9.1)    | 7.3      |         | <i>M. japonica</i>  | 1.0~104.9 (16.3)   | 20.9     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 0.35~47.8 (12.0)  | 2.9      |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.5~262.2 (23.3)   | 87.2     |
| Cu      | <i>A. argyi</i>     | 6.6~189.8 (53.6)  | 61.1     | Pb      | <i>A. argyi</i>     | 0.1~13.4 (2.7)     | 3.4      |
|         | <i>M. japonica</i>  | 2.9~83.5 (19.1)   | 16.1     |         | <i>M. japonica</i>  | 0.1~13.8 (2.3)     | 2.7      |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 4.8~111.1 (23.1)  | 26.6     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.1~13.3 (2.9)     | 3.1      |
| Zn      | <i>A. argyi</i>     | 9.3~146.4 (45.9)  | 45.7     | Bi      | <i>A. argyi</i>     | 0.7~602.2 (75.8)   | 200.5    |
|         | <i>M. japonica</i>  | 4.0~44.1 (15.1)   | 8.0      |         | <i>M. japonica</i>  | 1.2~172 (42.4)     | 34.2     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 6.3~65.2 (27.3)   | 14.7     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.5~692 (83.7)     | 230.5    |
| Mo      | <i>A. argyi</i>     | 1.7~144.8 (41.0)  | 80.1     | Th      | <i>A. argyi</i>     | 0.03~1.13 (0.3)    | 3.3      |
|         | <i>M. japonica</i>  | 0.84~52.3 (13.2)  | 10.3     |         | <i>M. japonica</i>  | 0.007~0.162 (0.06) | 0.03     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 2.7~54.69 (18.7)  | 16.8     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.02~0.21 (0.06)   | 0.05     |
| Cd      | <i>A. argyi</i>     | 2.5~242.8 (65.9)  | 76.7     | U       | <i>A. argyi</i>     | 0.07~0.6 (0.24)    | 0.16     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 0.744~12.37 (6.6) | 2.3      |         | <i>M. japonica</i>  | 0.029~0.24 (0.1)   | 0.03     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 1.3~141.8 (26.2)  | 35.1     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.04~0.28 (0.15)   | 0.06     |
| Sn      | <i>A. argyi</i>     | 6.9~237.0 (50.0)  | 36.0     |         |                     |                    |          |
|         | <i>M. japonica</i>  | 10.6~118.5 (33.7) | 21.6     |         |                     |                    |          |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 5.6~284.4 (54.2)  | 92.9     |         |                     |                    |          |

В зоне исследования три вида растений продемонстрировали высокую способность поглощать и накапливать биодоступные фракции металлов (Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi) в почве, при этом их средние значения  $X_{\text{ВАС}}$  превышали 5. Напротив, эти растения показали минимальное поглощение радиоактивных элементов (U, Th) из почвы, при этом средние значения  $X_{\text{ВАС}}$  были ниже 1. Среди трех видов, *A. Argyi* значительно поглощал и накапливал микроэлементы, такие как Cu, Zn, Mo и Cd, со средними значениями  $X_{\text{ВАС}}$  53,6, 45,9, 41,0 и 66,0 соответственно. *D. Dichotoma* продемонстрировала наибольшую способность поглощать и накапливать Ni, Sn, Sb, Pb и Bi, со средними значениями  $X_{\text{ВАС}}$  12,0, 54,2, 23.3, 2.9 и 83.9 соответственно. Напротив, *M. Japonica* обладал относительно более слабыми способностями к поглощению и накоплению этих микроэлементов. В целом, способности *A. Argyi* и *D. Dichotoma* по большинству микроэлементов превосходили таковые у *M. japonica*.

### 3.1.3. Индикаторные характеристики микроэлементов различных растений.

В этом исследовании оценивались индикаторные характеристики трёх растений по содержанию в них микроэлементов путём анализа концентрации микроэлементов в листьях и коэффициента контрастности отклонений ( $K_{\text{CD}}$ ) в одном и том же месте отбора проб. Как правило, средняя концентрация ( $\omega_o$ ) служит приблизительным показателем степени обогащения растений микроэлементами, в то время как значения  $K_{\text{CD}}$  для микроэлементов в растениях показывают величину геохимических аномалий. Кроме того, изменение концентрации микроэлементов в растениях даёт представление о надёжности их способности сигнализировать об аномалиях окружающей среды, связанных с микроэлементами.

Среди трех растений у *A. Argyi* были самые высокие концентрации B, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Sn, Th, U, Tl и Zn, при значениях  $\omega_o$  43.50, 1.91, 4.45, 0.601, 0.94, 22.0, 495.9, 1.673, 3.87, 0.327, 0.143, 0.084, 0.076, и 84,80 соответственно. *M. Japonica* продемонстрировала самые высокие концентрации Hg, Sb и Se со значениями  $\omega_o$  0,180, 0,695 и 0,966 соответственно. *D.*

*Dichotoma* имела самые высокие концентрации Ag, As, Mn и Pb со значениями  $\omega_o$  0,137, 86,12, 995,7 и 15,4 соответственно. *A. Argyi* продемонстрировал наиболее выраженные геохимические аномалии для В, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Th, Tl и U, с соответствующими значениями  $K_{CD}$  для 4.350, 2.182, 9.431, 4.522, 3.364, 3.590, 4.634, 7.503, 2.879, и 2.090. *M. Japonica* продемонстрировала наиболее выраженные геохимические аномалии для Hg, с  $K_{CD}$  равным 3.918. Аналогичным образом, *D. Dichotoma* демонстрировала заметные геохимические аномалии по Ag, As, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn и Zn со значениями  $K_{CD}$  3,497, 51,260, 1,682, 3,702, 2,430, 2,763, 2,028, 2,104, 2,660 и 2,861 соответственно (табл. 2).

Табл. 2.

**Концентрации микроэлементов ( $\omega_o$ ) и коэффициенты контрастности отклонений ( $K_{CD}$ ) для разных растений в одинаковых точках отбора.**

| Element | Plants (N = 20)     | $\omega_o$ (ug g <sup>-1</sup> ) | $\sigma$ | $K_{CD}$ | Element | Plants (N = 20)     | $\omega_o$ (ug g <sup>-1</sup> ) | $\sigma$ | $K_{CD}$ |
|---------|---------------------|----------------------------------|----------|----------|---------|---------------------|----------------------------------|----------|----------|
| Ag      | <i>A. argyi</i>     | 0.029–0.093 (0.059) *            | 0.016    | 1.33     | Mo      | <i>A. argyi</i>     | 0.62–3.36 (1.67)                 | 0.69     | 3.41     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 0.011–0.088 (0.048)              | 0.019    | 1.07     |         | <i>M. japonica</i>  | 0.34–0.76 (0.513)                | 0.11     | 1.05     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 0.028–1.33 (0.137)               | 0.65     | 3.50     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.28–2.47 (0.963)                | 1.10     | 3.70     |
| As      | <i>A. argyi</i>     | 2.12–9.44 (4.22)                 | 1.83     | 2.20     | Ni      | <i>A. argyi</i>     | 0.82–7.73 (3.87)                 | 2.30     | 2.39     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 0.609–4.34 (2.357)               | 0.93     | 1.23     |         | <i>M. japonica</i>  | 1.56–5.03 (2.47)                 | 0.87     | 1.36     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 0.636–1525 (86.1)                | 762.18   | 51.3     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.36–9.71 (3.79)                 | 3.12     | 2.43     |
| B       | <i>A. argyi</i>     | 20–70 (43.5)                     | 25.0     | 4.35     | Pb      | <i>A. argyi</i>     | 4.92–20.7 (9.91)                 | 3.95     | 1.77     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 10–29.9 (15.5)                   | 4.98     | 1.55     |         | <i>M. japonica</i>  | 3.62–13.1 (7.60)                 | 2.37     | 1.36     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 10–29.9 (12)                     | 4.98     | 1.33     |         | <i>D. dichotoma</i> | 1.94–70.8 (15.4)                 | 6.18     | 2.76     |
| Bi      | <i>A. argyi</i>     | 0.83–3.98 (1.91)                 | 1.05     | 2.18     | Sb      | <i>A. argyi</i>     | 0.328–1.19 (0.06)                | 0.26     | 1.47     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 0.59–2.55 (1.55)                 | 0.49     | 1.77     |         | <i>M. japonica</i>  | 0.278–1.315 (0.695)              | 0.39     | 1.71     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 0.16–5.54 (1.11)                 | 2.69     | 2.03     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.107–1.67 (0.46)                | 0.72     | 2.03     |
| Cd      | <i>A. argyi</i>     | 0.32–12.6 (4.45)                 | 6.14     | 9.43     | Se      | <i>A. argyi</i>     | 0.39–1.31 (0.758)                | 0.26     | 1.76     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 0.24–0.78 (0.509)                | 0.14     | 1.08     |         | <i>M. japonica</i>  | 0.36–1.4 (0.966)                 | 0.14     | 1.86     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 0.14–7.46 (2.06)                 | 0.23     | 4.36     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.16–1.74 (0.547)                | 0.29     | 2.10     |
| Co      | <i>A. argyi</i>     | 0.07–1.64 (0.601)                | 0.12     | 4.52     | Sn      | <i>A. argyi</i>     | 0.18–0.65 (0.327)                | 0.12     | 1.63     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 0.05–0.15 (0.107)                | 0.03     | 0.81     |         | <i>M. japonica</i>  | 0.06–0.5 (0.273)                 | 0.05     | 1.37     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 0.049–2.03 (0.504)               | 0.5      | 3.80     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.13–0.78 (0.282)                | 0.33     | 2.66     |
| Cr      | <i>A. argyi</i>     | 0.28–2.3 (0.942)                 | 0.41     | 3.36     | Th      | <i>A. argyi</i>     | 0.015–0.668 (0.143)              | 0.22     | 7.50     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 0.16–0.95 (0.354)                | 0.20     | 1.27     |         | <i>M. japonica</i>  | 0.006–0.066 (0.03)               | 0.02     | 1.57     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 0.07–1.6 (0.48)                  | 0.38     | 1.71     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.013–0.058 (0.026)              | 0.01     | 1.38     |
| Cu      | <i>A. argyi</i>     | 10.8–33.7 (22.0)                 | 7.63     | 3.60     | Tl      | <i>A. argyi</i>     | 0.031–0.224 (0.084)              | 0.05     | 2.88     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 4.76–8.26 (6.74)                 | 0.88     | 1.02     |         | <i>M. japonica</i>  | 0.028–0.09 (0.053)               | 0.02     | 1.56     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 4.95–17.3 (8.73)                 | 3.09     | 1.32     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.012–0.493 (0.063)              | 0.16     | 1.96     |
| Fe      | <i>A. argyi</i>     | 99–1402 (495.9)                  | 434.33   | 4.63     | U       | <i>A. argyi</i>     | 0.023–0.148 (0.076)              | 0.03     | 2.09     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 38–275 (139)                     | 59.25    | 1.30     |         | <i>M. japonica</i>  | 0.005–0.051 (0.032)              | 0.01     | 0.94     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 74–222 (124.5)                   | 42.33    | 1.16     |         | <i>D. dichotoma</i> | 0.029–0.089 (0.049)              | 0.02     | 1.35     |
| Hg      | <i>A. argyi</i>     | 0.037–0.08 (0.055)               | 0.08     | 1.19     | Zn      | <i>A. argyi</i>     | 24–202 (84.8)                    | 44.5     | 2.70     |
|         | <i>M. japonica</i>  | 0.008–0.403 (0.18)               | 0.08     | 3.92     |         | <i>M. japonica</i>  | 18.5–48 (24.6)                   | 7.38     | 0.99     |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 0.018–0.098 (0.05)               | 0.02     | 1.11     |         | <i>D. dichotoma</i> | 22.2–91.3 (46.15)                | 23.03    | 2.86     |
| Mn      | <i>A. argyi</i>     | 153.5–1980 (696.0)               | 608.83   | 1.18     |         |                     |                                  |          |          |
|         | <i>M. japonica</i>  | 152–1120 (856.4)                 | 252.5    | 1.45     |         |                     |                                  |          |          |
|         | <i>D. dichotoma</i> | 57.3–1860 (995.7)                | 469.2    | 1.68     |         |                     |                                  |          |          |

Геохимические аномалии на полиметаллическом месторождении Шизуюань, содержащем вольфрам и олово, выявили элементы-минерализаторы, такие как вольфрам, олово, молибден, висмут, медь, свинец, цинк, кадмий, мышьяк, сурьма, серебро и золото. Хотя *A. Argyi* заметно обогащена 14 микроэлементами, такими как В, Bi и Cd, демонстрируя значительные геохимические аномалии по 10 из этих элементов, *D. Dichotoma* охватывает самый широкий диапазон концентраций Ag, As, Bi, Mo, Ni, Pb, Sb, Se и Sn. Она также демонстрирует геохимические аномалии по Ag, As, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn и Zn, что указывает на потенциальное наличие аномалий минерализации в исследуемой области. Однако *M. Japonica* эффективно указывает только на аномалии ртути. Следовательно, *D. Dichotoma* является

наиболее подходящим растением-индикатором фитогеохимической минерализации в исследуемой области.

#### 3.1.4. Статистика геохимических параметров растений-индикаторов.

Основываясь на вышеупомянутом анализе и обсуждении, в этом исследовании основное внимание уделялось *D. Dichotoma* (листьям) для анализа геохимических свойств, содержащихся в них микроэлементов и оценки их значимости для поисков. Аналитические результаты включали интенсивность аномалии, стандартное отклонение, коэффициент обогащения ( $K_{NJ}$ ), коэффициент контрастности ( $K_{CD}$ ) и коэффициент изменчивости ( $C_v$ ) для каждого микроэлемента.  $K_{NJ}$ , использующий среднюю концентрацию глобальных растительных элементов в качестве регионального фона, приблизительно отражает фон элементной минерализации;  $K_{CD}$ , основанный на средней концентрации растительных элементов в контрольной зоне в качестве регионального фона, указывает на степень фитогеохимических аномалий. Кроме того,  $C_v$  служит важным параметром для оценки степени элементной дифференциации. В одинаковых условиях (при одинаковом  $K_{NJ}$ ) элементы с высоким  $C_v$  демонстрируют значительную дифференциацию и легко обогащаются локально для минерализации.

Результаты анализа приведены в таблице 3. В образцах *D. Dichotoma* такие элементы, как Ag, As, Bi, Co, Hg, Mn, Mo, Pb, Sb, Se, Sn, Th и U, демонстрировали сильный фон минерализации, при этом значения  $K_{NJ}$  составляли 14.30, 1466.0, 1053.0, 2.317, 2.745, 4.236, 2.260, 14.71, 4.537, 27.49, 1.139, 5.127, и 5.054, соответственно. Геохимические аномалии для таких элементов, как Ag, As, Bi, Cd, Co, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn и Zn, были выраженными, со значениями  $K_{CD}$ , равными 7.526, 89.390, 1.932, 3.657, 3.534, 4.431, 2.726, 2.679, 2.000, 2.125, 2.621, и 2.029, соответственно. Такие элементы, как Ag, As, Bi, Cd, Co, Fe, Mo, Ni, Sb и Tl, продемонстрировали значительную геохимическую дифференциацию, со значениями  $C_v$  1.618, 2.847, 1.022, 1.038, 1.014, 1.006, 1.027, 1.190, 1.252, и 1.411 соответственно. Образцы *D. dichotoma*, содержащие Ag, Bi, Mo, Pb, Sb, Se и Sn, не только демонстрируют благоприятный металлогенический фон, отчетливые геохимические аномалии и выраженные дифференцирующие характеристики, но также обладают высоким потенциалом локального обогащения минерализацией, что соответствует металлогеническим условиям исследуемого района.

Геохимические параметры основных растений в горнодобывающем районе Шичжуйюань.

| Element (N = 42) | $\omega_o$ (ug/g) | $\omega_{max}$ (ug/g) | $\omega_{min}$ (ug/g) | $\sigma$ | $K_{NJ}$ | $K_{CD}$ | $C_v$ | $\omega_b$ (ug/g) |
|------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|----------|----------|----------|-------|-------------------|
| Ag               | 0.286             | 1.585                 | 0.028                 | 0.463    | 14.30    | 7.526    | 1.618 | 0.038             |
| As               | 146.6             | 1970                  | 0.636                 | 417.370  | 1466     | 89.390   | 2.847 | 1.640             |
| B                | 14.88             | 40.00                 | 10.00                 | 9.404    | 0.372    | 1.667    | 0.632 | 8.926             |
| Bi               | 1.053             | 5.540                 | 0.065                 | 1.076    | 1053     | 1.932    | 1.022 | 0.545             |
| Cd               | 1.693             | 7.460                 | 0.134                 | 1.757    | 33.86    | 3.657    | 1.038 | 0.463             |
| Co               | 0.463             | 2.030                 | 0.043                 | 0.469    | 2.317    | 3.534    | 1.014 | 0.131             |
| Cr               | 0.494             | 1.600                 | 0.060                 | 0.371    | 0.329    | 1.777    | 0.752 | 0.278             |
| Cu               | 9.786             | 22.70                 | 4.150                 | 5.891    | 0.979    | 1.493    | 0.602 | 6.555             |
| Fe               | 129.6             | 254.0                 | 74.00                 | 130.378  | 0.864    | 1.217    | 1.006 | 106.5             |
| Hg               | 0.055             | 0.130                 | 0.018                 | 0.026    | 2.745    | 1.196    | 0.481 | 0.046             |
| Mn               | 847.3             | 2070                  | 55.60                 | 597.347  | 4.236    | 1.438    | 0.705 | 589.2             |
| Mo               | 1.130             | 2.940                 | 0.170                 | 1.161    | 2.260    | 4.431    | 1.427 | 0.255             |
| Ni               | 4.171             | 12.40                 | 0.350                 | 4.963    | 0.278    | 2.726    | 1.19  | 1.530             |
| Pb               | 14.71             | 70.80                 | 1.940                 | 8.105    | 14.71    | 2.679    | 0.551 | 5.491             |
| Sb               | 0.454             | 1.670                 | 0.056                 | 0.568    | 4.537    | 2.000    | 1.252 | 0.227             |
| Se               | 0.550             | 1.740                 | 0.160                 | 0.279    | 27.49    | 2.124    | 0.507 | 0.259             |
| Sn               | 0.228             | 0.780                 | 0.030                 | 0.144    | 1.139    | 2.621    | 0.631 | 0.087             |
| Th               | 0.026             | 0.058                 | 0.008                 | 0.011    | 5.127    | 1.368    | 0.416 | 0.019             |
| Tl               | 0.052             | 0.493                 | 0.010                 | 0.073    | 0.010    | 1.625    | 1.411 | 0.032             |
| U                | 0.051             | 0.115                 | 0.027                 | 0.021    | 5.054    | 1.342    | 0.407 | 0.038             |
| Zn               | 49.98             | 97.10                 | 22.20                 | 19.292   | 1.250    | 2.029    | 0.386 | 24.63             |

### 3.2. Многомерный статистический анализ

Из-за перекрывающихся или частично перекрывающихся эффектов нескольких геологических процессов в одном и том же регионе региональные геохимические данные обычно характеризуются многоэлементными или многовариантными характеристиками. Чтобы различить влияние различных геологических процессов, исследователи обычно используют кластерный анализ R-типа и факторный анализ R-типа для выявления взаимосвязей между элементами, закономерностей их совместного нахождения и характеристик региональной минерализации.

#### 3.2.1. Кластерный анализ R-типа.

Кластерный анализ R-типа был проведён на основе геохимических данных по 21 микроэлементу из образцов *D. Dichotoma* (N=42), нормализованных по z-шкале, с использованием SPSS 20.0. Были получены спектрограммы, которые позволили выявить взаимосвязи между элементами. Как показано на рисунке 3, с коэффициентом расстояния 10 21 микроэлемент был разделён на пять отдельных групп.

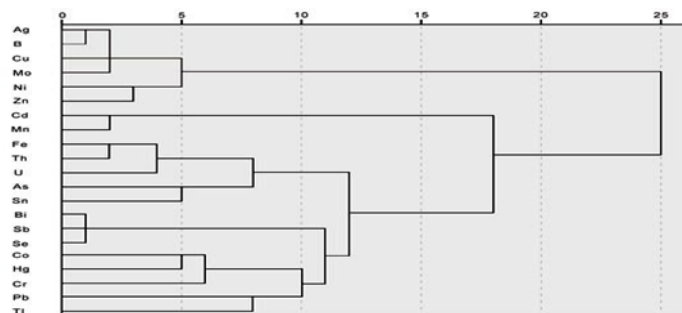


Рис. 3 Кластерный анализ спектра микроэлементов ключевого растения в районе Шичжуйюань.

Первая группа, включающая переходные элементы Ag, Cu, B, Mo, Ni и Zn, отражает различные гидротермальные наложения, при этом Ag, Cu и Mo демонстрируют более тесные

пространственные связи. Вторая группа включает переходные элементы Cd и Mn, которые представляют собой комбинацию окислительных элементов. Третья группа, состоящая из металлических элементов Fe, Th, U, As и Sn, указывает на влияние средне- и высокотемпературных гидротермальных флюидов, при этом Sn демонстрирует большую пространственную независимость. Четвёртая группа, состоящая из цветных металлов Bi, Sb и Se, демонстрирует сильное сродство к сере, легко образуя ковалентные связи с ионами серы, и имеет тесные пространственные связи. Пятая группа, состоящая из переходных элементов Co, Hg, Cr, Pb и Tl, отражает различные гидротермальные эффекты, при этом эти элементы демонстрируют относительную пространственную независимость. Кроме того, потенциальные рудообразующие элементы Sn, Mo, Bi, Zn, Cu и Pb распределены по разным группам элементов, демонстрируя сильную независимость друг от друга. Это указывает на пространственное распределение рудообразующих элементов в исследуемой области.

### 3.2.2. Факторный анализ.

В этом исследовании для более глубокого изучения пространственных закономерностей распределения потенциальных минерализующих элементов использовался факторный анализ. Согласно критерию сферичности Бартлетта и показателю Кайзера — Мейера — Олкина (КМО), значение значимости (Sig), полученное с помощью критерия Бартлетта, составило 0,00, а индекс КМО достиг 0,788, что превышает рекомендованный Кайзером порог в 0,6. Эти результаты указывают на значительную взаимосвязь внутри набора данных, что делает его подходящим для факторного анализа. Был применён анализ главных компонент и варимакс-вращение на основе собственных значений  $>1$  и совокупного вклада дисперсии  $>81,366\%$ . Факторы были получены из факторных нагрузок, абсолютное значение которых превышало 0,6, что привело к образованию четырёх отдельных наборов факторов, как показано в таблице 4.

Табл. 4.

**Матрица коэффициентов ортогональной нагрузки микроэлементов доминирующей растительности в районе Шичжуйюань.**

| Element                            | F1     | F2     | F3     | F4     |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Ag                                 | 0.194  | 0.035  | 0.698  | 0.557  |
| As                                 | 0.818  | 0.240  | 0.107  | 0.318  |
| B                                  | 0.447  | 0.318  | -0.061 | 0.640  |
| Bi                                 | 0.674  | 0.139  | 0.450  | 0.465  |
| Cd                                 | 0.550  | 0.731  | -0.184 | -0.011 |
| Co                                 | 0.622  | 0.650  | 0.033  | -0.094 |
| Cr                                 | 0.773  | 0.335  | 0.102  | -0.088 |
| Cu                                 | 0.335  | 0.831  | -0.022 | 0.156  |
| Fe                                 | 0.894  | 0.378  | 0.086  | 0.072  |
| Hg                                 | 0.259  | 0.371  | 0.559  | 0.443  |
| Mn                                 | 0.199  | 0.546  | 0.512  | -0.157 |
| Mo                                 | -0.071 | -0.302 | 0.144  | 0.706  |
| Ni                                 | 0.056  | 0.823  | 0.196  | -0.078 |
| Pb                                 | 0.696  | 0.545  | 0.218  | 0.162  |
| Sb                                 | 0.654  | 0.158  | 0.476  | 0.507  |
| Se                                 | 0.281  | 0.631  | 0.280  | 0.401  |
| Sn                                 | 0.709  | 0.150  | 0.502  | 0.407  |
| Th                                 | 0.892  | 0.361  | 0.105  | 0.026  |
| Tl                                 | 0.105  | -0.101 | 0.921  | 0.028  |
| U                                  | 0.736  | 0.106  | 0.407  | 0.219  |
| Zn                                 | 0.407  | 0.852  | -0.105 | 0.000  |
| % of Variance (rotated)            | 31.819 | 23.359 | 14.437 | 11.752 |
| Cumulative % of variance (rotated) | 31.819 | 55.177 | 69.614 | 81.366 |

F1 представляет собой As–Cr–Fe–Sn–Th–U с коэффициентом дисперсии 31,819%, характеризующимся как сочетание низко-, средне- и высокотемпературных элементов, отражающих наложение нескольких гидротермальных процессов. F2 представляет собой Cd–Cu–Ni–Zn с коэффициентом вклада дисперсии 23,359%, что указывает на сочетание низко- и среднетемпературных элементов, отражающих магматическую и гидротермальную активность, связанную с кислыми и умеренно кислыми интрузивными породами в регионе. F3 и F4 представляют собой Tl и Mo соответственно с коэффициентами вклада дисперсии 14,437% и 11,752% соответственно. Оба они являются независимо существующими высокотемпературными элементами, что дополнительно свидетельствует о высокотемпературной гидротермальной минерализации. Согласованность результатов кластерного анализа R-типа и факторного анализа подтверждает их общее происхождение.

#### **4. Обсуждение.**

##### **4.1. Факторы, влияющие на содержание микроэлементов в растениях.**

Органы большинства растений можно разделить на корни, стебли, ветви, кору, листья и плоды, каждый из которых выполняет определённые физиологические функции и имеет значительные различия в элементном составе и концентрации. Биогеохимическое исследование м-ния Твин-Лейкс в северо-западной части провинции Супериор с использованием коры, веток и хвои *Picea mariana* показало, что такие элементы, как Au, As, Bi, Se, Sb, Tl, Fe, Co, Ni, Cr, Mo, Cd, Pb, Zn, Ca, Ba и Cu, преимущественно накапливаются в ветках и коре, в то время как B, K, Mg, Mn и P преимущественно концентрируются в хвое. Эти различия отражают разную способность органов растений поглощать и концентрировать микроэлементы. В этом исследовании, как показано в таблице 3, концентрация меди (4,2–22,7 мкг/г), железа (74–254 мкг/г), марганца (56–2070 мкг/г), молибдена (0,2–3 мкг/г) и цинка (22–97 мкг/г) в листьях *Dicranopteris dichotoma* была относительно высокой, вероятно, потому, что эти элементы являются необходимыми для роста растений. Например, железо и марганец играют важнейшую роль в процессах фотосинтеза у растений. Как правило, растения вырабатывают механизмы защиты от элементов, которые являются для них высокорadioактивными или токсичными. Однако *Dicranopteris dichotoma*, по-видимому, обладает высокой устойчивостью к вредным тяжёлым металлам, таким как мышьяк (1–1970 мкг/г), кадмий (0,2–7,5 мкг/г) и свинец (2–71 мкг/г), что может быть связано с его адаптивными физиологическими механизмами. Значения  $K_{NJ}$  и  $K_{CD}$  для таких элементов, как Ag, As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Th, Tl, U и Zn, превысили 1, что указывает на то, что *D. Dichotoma* в районе полиметаллической добычи в Шичжюане реагирует на стресс, вызванный

высокой концентрацией металлов в почве, горных породах или грунтовых водах, что приводит к обогащению полиметаллами. рН почвы является ключевым фактором, влияющим на биодоступность микроэлементов, поскольку он тесно связан с их активностью. В почвах с низким рН большое количество ионов водорода способствует высвобождению ионов микроэлементов с гидроксильных поверхностей глинистых минералов, повышая их концентрацию и активность, что способствует их накоплению в растениях. В этом исследовании изучаемая территория характеризуется кислыми почвами с уровнем рН от 4,6 до 6,8, что может отчасти объяснять лёгкость, с которой растения накапливают микроэлементы.

#### **4.2. Проверка результатов на основе минерализации и геологических данных.**

В ходе анализа содержания микроэлементов в трёх доминирующих видах растений органы листьев *Dicranopteris dichotoma* были определены как ключевое растение-индикатор и место отбора проб. Это исследование подтвердило достоверность результатов с помощью различных аналитических методов. Ag, As, Bi, Cd, Pb, Mo, Sn, Ti, U и Zn продемонстрировали чёткие закономерности обогащения и геохимические аномалии в образцах растений, при этом значения  $K_{NI}$  превысили 5, значения  $K_{CD}$  превысили 2, а все значения  $C_v$  превысили 1. Геохимические аномальные характеристики полиметаллического м-ния Шизуюань, содержащего вольфрам и олово, выявили элементы-минерализаторы, такие как вольфрам, олово, молибден, висмут, медь, свинец, цинк, кадмий, мышьяк, сурьма, серебро и золото. По сравнению с известными характеристиками распределения элементов-минерализаторов, *Dicranopteris dichotoma* демонстрирует значительные геохимические аномалии по таким элементам, как серебро, мышьяк, висмут, молибден, никель, свинец, сурьма, селен и олово. В сочетании с результатами кластерного анализа R-типа и факторного анализа система минерализации в исследуемой области демонстрирует сложные характеристики гидротермальной эволюции. Независимое распределение потенциальных минерализующих элементов, таких как Sn, Mo, Bi, Zn, Cu и Pb, в пределах соответствующих групп позволяет предположить, что они могли образоваться в результате различных гидротермальных процессов или стадий минерализации. Разнообразные сочетания средне-, высоко- и низкотемпературных гидротермальных процессов в исследуемой области ещё больше подчёркивают сложность минерализующей среды и потенциальных рудных месторождений. Эти результаты в совокупности подтверждают эффективность *Dicranopteris dichotoma* в качестве индикаторного растения для поисков рудных м-ний.

#### **4.3. Ограничения и перспективы на будущее.**

Хотя это исследование демонстрирует потенциал фитогеохимических методов для изучения глубоко залегающих «скрытых» рудных тел, остаётся несколько ограничений.

Несмотря на обширные биогеохимические исследования по всему миру, процессы, с помощью которых минерализующие элементы мигрируют из м-ний, на поверхность, поглощаются, транспортируются и накапливаются растениями в различных органах, по-прежнему очень сложны и недостаточно изучены.

Будущие исследования должны быть в большей степени сосредоточены на механизмах обогащения растений различными микроэлементами, чтобы повысить точность и надёжность данных.

## 5. Выводы.

1. В ходе этого исследования изучались геохимические характеристики микроэлементов в доминирующих видах растений в рудном районе Шичжюань. Было показано, что образцы растений демонстрируют благоприятный минеральный фон, геохимические аномалии и закономерности дифференциации, что доказывает целесообразность использования фитогеохимических методов для поисков рудных м-ний.

2. При анализе средней концентрации сухого вещества ( $\omega_o$ ) и коэффициента контрастности ( $K_{CD}$ ) в стеблях и листьях трёх местных доминирующих видов растений — *Artemisia argyi*, *Maesa japonica* и *Dicranopteris dichotoma* — было обнаружено, что листовые органы не только обладают более высокой способностью к обогащению микроэлементами, но и демонстрируют более выраженные геохимические характеристики. Таким образом, листовые органы являются оптимальным местом для отбора проб для изучения фитогеохимических характеристик местных растений.

3. Коэффициент поглощения ( $X_{BAC}$ ) биодоступных металлических элементов в почве и коэффициент контрастности ( $K_{CD}$ ) по отношению к фоновой области показали, что *D. Dichotoma* демонстрирует более выраженные геохимические аномальные характеристики для потенциальных элементов минерализации (Ag, As, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn) в пределах исследуемой области. Это указывает на то, что *D. Dichotoma* особенно хорошо подходит в качестве индикаторного растения для поиска полезных ископаемых в этом регионе.

4. С помощью кластерного и факторного анализа геохимических данных растений потенциальные минерализующие элементы были разделены на четыре группы: (1) Sn–As, (2) Ag–Cu–Mo, (3) Pb и (4) Bi–Sb–Se. Это указывает на чёткое пространственное распределение минерализующих элементов на территории исследования, что даёт ценные рекомендации для будущих поисков.

5. Полученные результаты открывают новые эффективные возможности для изучения «скрытых» рудных тел в схожих геологических условиях и служат важной основой для будущих ГРР.

6. Хотя это исследование подтверждает эффективность фитогеохимических методов для обнаружения «скрытого» оруденения, необходимы дальнейшие исследования для уточнения механизмов обогащения растений и оценки применимости метода в различных геологических условиях.

## II. РЕСУРСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: РАЗРАБОТКА СЦЕНАРИЕВ ПОИСКОВ, РАЗВЕДКИ И ОСВОЕНИЯ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ М-НИЙ (*район Сан-Антонио-Потрерильос, Чили*). [2]

### 1. Введение.

В этом материале представлена методология создания гибких сценариев в контексте потенциального развития ГРП на основе разрозненных данных, собранных за длительное время на обширной рудоперспективной территории на севере Чили.

Оценка ресурсов на уровне района в медно-порфировых системах с молибденом и серебром может быть чрезвычайно сложной задачей из-за комплексности процессов минерализации, пространственной изменчивости минерализации и необходимости одновременного моделирования нескольких коррелирующих элементов.

Из-за разной плотности данных, разнообразия типов данных с разным качеством, ограниченности геологической информации в разных частях района и различий в типах рудных м-ний детальный анализ всей информации и оценка последствий различных решений, принимаемых при моделировании, требуют участия большой команды и длительного времени.

Оценка потенциала минеральных ресурсов с учетом неопределенности все чаще требует применения методологий, выходящих за рамки локальных оценок и детерминированных моделей. Традиционные методы моделирования ресурсов, основанные на фиксированных допущениях о геологической интерпретации рудного тела и его геометрии, а также о пространственном распределении элементов, представляющих поисковый интерес, плохо подходят для принятия решений на ранних этапах проектов ГРП. Из-за нехватки данных, различий в их качестве и разрешении, а также неподтвержденных предположений о геологических факторах модели могут давать неверные представления об истинных условиях локализации и пространственном распределении руды.

Создание множества моделей, охватывающих весь спектр возможных сценариев, представляет собой новую парадигму, основанную на моделировании и подходах к принятию решений, которые могут помочь справиться с неопределенностью. Вместо того чтобы искать единственно верную модель, этот подход предполагает создание и анализ набора возможных сценариев, чтобы выявить комбинации предположений и условий, которые приводят к существенно различающимся результатам. Это предполагает возникновение сценариев, которые существенно отличаются от базовых предположений.

В контексте оценки минеральных ресурсов при ГРП этот подход реализуется в виде рабочих процессов, в которых особое внимание уделяется созданию множества геологически и статистически обоснованных моделей, каждая из которых имеет свою конфигурацию границ,

пространственную непрерывность, обработку аномальных данных и воспроизведение многомерных взаимосвязей. Затем эти модели можно интегрировать в систему принятия решений, где можно оценить чувствительность критических переменных и решений, принимаемых при моделировании. Такой подход рассматривает моделирование не как поиск точности при фиксированных входных данных, а как структурированное исследование пространства неопределённости, в рамках которого понимание приходит через осознание условий, при которых решения оказываются неудачными, успешными или требуют пересмотра. Этот подход согласуется с геостатистическими методами количественной оценки неопределённости с помощью стохастического моделирования и расширяет их, встраивая эти сценарии в более широкую систему поддержки принятия решений.

Как правило, при моделировании ресурсов приоритет отдается геологической интерпретации и оценке, в основном в одномерном контексте, характеризующем наиболее важный экономический элемент. Эти процессы требуют много времени, они негибки и с трудом поддаются адаптации, когда на ранних этапах оценки проекта необходима оперативная обратная связь, главным образом потому, что геологическая интерпретация требует значительного ручного труда. Кроме того, однофакторная оценка ограничивает предсказуемость эффективности процесса, поскольку не учитывает геотехнологическую значимость множества характеристик, неаддитивный характер откликов и экономическую значимость множества побочных продуктов и «вредных загрязняющих веществ». Поскольку в проектах по поискам м-ний все чаще требуется ускорять сроки проведения ГРП, снижать неопределенность и оптимизировать инвестиционные решения, возможность проверки различных предположений путем быстрого создания различных сценариев имеет большое значение и позволяет своевременно принимать оптимальные решения по проекту.

В этом исследовании рассматривается использование различных технологических достижений для быстрого создания гибких многомерных ресурсных моделей в поддержку оценки проектов. Работа проводилась в сотрудничестве с компанией Codelco Chile (Gerencia Corporativa de Exploraciones) и ее дочерней компанией Exploraciones Mineras Andinas S.A. (EMSA). В качестве примера был выбран район Сан-Антонио — Потрерильос. Для работы использовалась *Annapurna™ Resource*, специализированная программная платформа для быстрого и гибкого геостатистического моделирования.

Этот подход был направлен на создание моделей для меди, молибдена, золота, серебра и мышьяка с учетом определения предметной области, стратегий оценки и анализа неопределенности на основе моделирования. Особое внимание уделялось моделированию в условиях дефицита данных, где пространственная непрерывность и взаимосвязи между

элементами играют решающую роль в моделировании минеральных ресурсов. Вклад этой работы заключается в демонстрации того, как можно эффективно внедрять передовые методы геостатистического моделирования, которые достигли значительного уровня развития для практического применения. При этом время разработки моделей соответствует потребностям на ранних этапах проекта, что обеспечивает быструю обратную связь между моделированием, интерпретацией, планированием и принятием решений. Это считается ключевым аспектом успешного управления ГРП проектами. Представлен статистический анализ для определения областей оценки, использования вероятностных методов, таких как индикаторный кригинг (ИК) для определения границ геологических областей, а также последовательное гауссовское моделирование (ПГМ) и многомерное преобразование методом проекционного преследования (ПМПП) для определения гранулометрического состава. Выводы, сделанные на основе этих моделей, проиллюстрированы на примере ГРП на уровне района.

## **2. Методология.**

### **2.1. Общие положения**

Для моделирования многокомпонентных м-ний, таких как м-ния в районе Сан-Антонио — Потрерильос, необходима методологическая база, объединяющая геологическую интерпретацию с инструментами геостатистического моделирования. Методология включает в себя следующее:

- *Создание сценариев геологической модели:* включает в себя проверку допущений, принятых при моделировании, статистический анализ факторов, влияющих на минерализацию, анализ допущений, связанных с геологическими областями, и вероятностную проверку геологической модели. Инструменты, используемые для поискового анализа данных, не являются сложными и широко применяются геологами, занимающимися ГРП. Однако оптимизация процесса создания этих графиков и сводных статистических данных может значительно ускорить анализ и позволить лучше понять взаимосвязь между градацией, минеральными зонами, литологией, изменениями и структурными областями. Для выявления статистически значимых различий в поведении соответствующих факторов, влияющих на минерализацию, важно равномерно распределять данные по категориям. Для вероятностной проверки геологической модели используются более продвинутые инструменты, такие как геостатистическое моделирование индикаторов и, возможно, другие методы категориального моделирования.

- *Создание сценариев для моделирования содержания полезных компонентов:* на этом этапе рассматриваются различные подходы к моделированию распределения содержания меди,

молибдена, золота, серебра и мышьяка в различных районах округа. Это включает в себя построение одномерных моделей с использованием геометрических методов (метод ближайшего соседа и метод взвешивания по обратному расстоянию), а также геостатистического метода — обычного кригинга. Кроме того, с помощью метода гауссовского моделирования строятся одномерные имитационные модели для количественной оценки неопределённости, а также проводится анализ размера блоков, чтобы понять, как он влияет на селективность, с особым вниманием к содержанию меди. Многомерные модели также создаются с помощью метода гауссовской имитации после преобразования исходных переменных с помощью метода Projection Pursuit Multivariate Transformation. Затем эти модели подвергаются анализу чувствительности к подходам к обработке выбросов, граничным условиям и параметрам вариограммы для количественной оценки неопределенности, связанной с совместным распределением пяти интересующих нас элементов.

- *Обобщение и устранение неопределенности:* была проведена предварительная классификация ресурсов на основе расстояния между скважинами для определения участков с достоверной информацией для принятия решений, а также разработан подход к рекомендации размещения новых скважин на основе оптимизации многокритериальной целевой функции.

## **2.2. Инструменты.**

### Статистический исследовательский анализ данных

Проверка предположений, лежащих в основе геологической модели, проводится в основном с помощью инструментов анализа данных, которые широко используются при моделировании минеральных ресурсов и геостатистическом моделировании, таких как сводная описательная статистика, графики вероятностей, точечные диаграммы и диаграммы размаха. Кроме того, согласованность данных оценивается путем сравнения данных каротажа с интерпретированными геологическими объемами по различным геологическим характеристикам, включая зону минерализации, изменения и литологические единицы. Для этого строятся таблицы сопряженности между данными каротажа и смоделированными единицами. Этот анализ проводится по секторам, связанным с различными рудоносными зонами, обнаруженными в районе.

Корреляционные матрицы между различными классами по единицам минерализации также можно использовать для выявления участков со схожими характеристиками.

### Пространственный исследовательский анализ данных

Пространственную непрерывность и ориентацию различных элементов рудных тел можно охарактеризовать с помощью карт вариограмм. В данном случае анализируемая переменная представляет собой индикатор, указывающий на наличие или отсутствие определенного

элемента, закодированного как 1 (присутствует) или 0 (отсутствует) в имеющихся образцах. Этот анализ можно сравнить с результатами ручной геологической интерпретации, проведенной в каждом секторе, чтобы выявить области, в которых интерпретируемая модель чрезмерно экстраполирует данные или где наблюдается несоответствие в локальной ориентации рудного тела.

#### Геостатистическое прогнозирование и оценка

Обычный кригинг — это хорошо зарекомендовавший себя метод, который использует пространственную корреляцию переменной, характеризуя ее пространственную непрерывность с помощью вариограммной модели, которая используется для определения оптимальных весовых коэффициентов при пространственной интерполяции с помощью взвешенной линейной оценки. Обычный кригинг, а также геометрические интерполяторы, такие как метод ближайшего соседа и метод обратных расстояний, используются для создания одномерных оценок по каждому элементу отдельно, что является общепринятой практикой. Они сверяются с данными скважин в поперечных сечениях и на планах, а также сопоставляются с помощью карт и сводных статистических таблиц.

Распределение геологических областей можно охарактеризовать с помощью индикаторного кригинга (ИК), который позволяет количественно оценить вероятность обнаружения объектов определенной категории в каждой точке модели. Для этого необходимо сначала закодировать категориальные данные в индикаторы.

$$i(\mathbf{u}_\alpha; k) = \begin{cases} 1, & \text{if } s(\mathbf{u}_\alpha) = k \\ 0, & \text{if } s(\mathbf{u}_\alpha) \neq k \end{cases} \text{ for } k = 1, \dots, K \quad (1)$$

Где  $\mathbf{u}_\alpha$  представляет собой примерное местоположение, где находится категория  $ss$  равно  $kk$ , один из самых  $KK$  исчерпывающие и взаимоисключающие категории атрибута  $ss$ .

Эта новая векторная индикаторная переменная интерпретируется как векторная случайная величина и моделируется как случайная функция. Для этого необходимо охарактеризовать пространственную непрерывность с помощью индикаторных вариограмм, а затем определить распределение вероятностей в местах, где данные не были получены, с помощью индикаторного кригинга.

Эти модели можно усовершенствовать с помощью локально изменяющихся направлений. Полученная в результате модель индикаторного кригинга позволяет выявлять участки с недостаточным количеством опорных точек или с отклонениями от зарегистрированной (или смоделированной) геологической информации.

### Геостатистическое моделирование

Существует множество методов геостатистического моделирования, от раннего метода моделирования безусловных поворотных полос, изначально разработанного Матерном и Матероном и дополненного условиями Журнелем, до последовательной реализации мультигауссова моделирования, представленного в пакете GSLIB и позднее распространенного на многомерный случай.

Одномерное моделирование воспроизводит пространственную непрерывность интересующей нас переменной с учетом контрольных точек и кластерного распределения. Однако при независимом моделировании каждой переменной не воспроизводятся взаимосвязи между ними. Эти взаимосвязи чрезвычайно важны, поскольку они могут изменить ценность выявленного рудного тела, повысив ее из-за наличия побочных продуктов или снизив ее из-за наличия вредных элементов. В геометаллургии наличие определенных минералов может существенно влиять на коэффициент извлечения или производительность. При планировании ГРП и технико-экономической оценке горнодобывающих проектов необходимо учитывать эти многофакторные взаимосвязи, чтобы правильно оценить результаты реализации проекта.

Методы многомерного моделирования отошли от жесткой схемы совместного моделирования коррелированных элементов с использованием линейной модели корегионализации (Linear Model of Coregionalization, LMC) в рамках мультигауссовой модели. В основном это связано с трудностями практической реализации LMC, а также с тем, что большинство многомерных распределений не соответствуют условиям, необходимым для использования мультигауссовой модели. Наличие минералогических ограничений, нелинейностей и гетероскедастичности препятствует использованию мультигауссовой модели. Решение заключалось в том, чтобы найти преобразования исходных переменных, которые соответствовали бы условиям мультигауссовой модели. В идеале эти преобразования также устраняют корреляцию между преобразованными переменными, чтобы их можно было моделировать независимо друг от друга, а полученные реализации преобразовывать обратно для восстановления необходимой пространственной корреляции и взаимных корреляций. Это относится к многомерному преобразованию методом проекционного поиска (Projection Pursuit Multivariate Transformation, PPMТ), которое включает в себя независимое преобразование нормальных значений для каждой переменной, сферизацию данных и проекционный поиск.

Основная идея PPMТ заключается в том, чтобы найти одномерную проекцию многомерного распределения, которая наиболее сильно отличается от одномерного стандартного нормального распределения. Затем эта проекция нормализуется (то есть

преобразуется в стандартное нормальное распределение), и этот процесс итеративно повторяется для разных проекций до тех пор, пока не будет достигнут критерий остановки.

Задан многомерный случайный вектор  $\mathbf{Z}(\mathbf{u})=[Z_1(\mathbf{u}), Z_2(\mathbf{u}), \dots, Z_p(\mathbf{u})]^T$ , линейная комбинация  $\mathbf{a}^T \mathbf{Z}(\mathbf{u})$  который максимизирует индекс негауссовости  $J(\mathbf{a})$ . Затем проекция преобразуется в обычную оценочную переменную. Этот процесс повторяется многократно.

$$\mathbf{Y}^{(k)}(\mathbf{u}) = \Phi^{-1}\left(F_k\left(\mathbf{a}_k^T \mathbf{Z}(\mathbf{u})\right)\right) \quad (2)$$

где  $\Phi^{-1}$  — обратная стандартная функция распределения Гаусса, а  $F_k$  является функцией распределения  $k$ -th проекция.

Множество преобразованных проекций  $\mathbf{Y}(\mathbf{u})=[\mathbf{Y}^{(1)}(\mathbf{u}), \mathbf{Y}^{(2)}(\mathbf{u}), \dots, \mathbf{Y}^{(K)}(\mathbf{u})]^T$ . Затем данные сохраняются. Эти новые переменные можно смоделировать с помощью традиционных алгоритмов мультигауссовой имитации. Сохраненные проекции также используются для обратного преобразования смоделированных многомерных векторов, чтобы получить вектор в исходных единицах измерения и сохранить взаимосвязи как в пространстве, так и с точки зрения статистического распределения.

#### Локальное моделирование поля направлений

Большинство методов оценки и моделирования основаны на предположении о стационарности и глобальном моделировании локальных средних значений, дисперсии, пространственной непрерывности и корреляции между переменными.

Таким образом, пространственная непрерывность часто моделируется с помощью единого глобального набора осей, представляющих основные направления анизотропии. Рудные тела не подчиняются глобальному направлению анизотропии и часто имеют складчатую структуру и разломы, которые нарушают пространственную непрерывность. Эти локальные ориентации могут зависеть от непрерывности основных структур и областей. Таким образом, модели оценки и моделирования можно адаптировать к этим локальным ориентациям, используя локально изменяющееся поле анизотропии. Для этого необходимо вычислить криволинейные расстояния и убедиться, что системы уравнений кригинга в каждой точке, полученной в результате оценки или моделирования, соответствуют математическим условиям, необходимым для получения решения. Более простой подход заключается в использовании этих анизотропий для простого поворота поискового эллипсоида и корректировки анизотропии вариограммы без необходимости вычисления криволинейных расстояний. Определение локальных анизотропий может основываться на геометрии твердых тел, представляющих собой домены или геологические образования, на использовании определенных поверхностей

(например, в стратиграфии) или на анализе непрерывной переменной при наличии большого объема данных.

Локальные ориентации определяются на основе имеющихся данных о твердых телах, поверхности или локальных вариограммных картах, на которых выявляются основные направления. Затем с помощью интерполяции матрицы направляющих косинусов (DCM) создается локально изменяющееся поле направлений. DCM представляет собой матрицу поворота  $\mathbf{R}$ , которая должна быть ортогональной с определителем 1:  $\mathbf{R}^T\mathbf{R}=\mathbf{I}$  и  $\det(\mathbf{R})=1$ , где  $\mathbf{I}$  является идентификационной матрицей.

Направляющие косинусы для заданного направления *azimuth* (по часовой стрелке относительно севера) и *dip* (при положительном значении, направленном вверх)

$$\begin{aligned} l &= \cos(\alpha) = \cos(dip) \cdot \sin(azimuth) \\ m &= \cos(\beta) = \cos(dip) \cdot \cos(azimuth) \\ n &= \cos(\gamma) = \sin(dip) \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда мы можем определить единичный вектор направления  $\mathbf{v}=(l,m,n)=(\cos(\alpha),\cos(\beta),\cos(\gamma))$ , которая указывает на определенное направление в трехмерном пространстве. Координатная плоскость создается путем определения произвольного направления, не параллельного  $\mathbf{v}$ , и вычисление вектора  $\mathbf{a}$  перпендикулярно  $\mathbf{v}$ , спроецировав следующим образом:  $\mathbf{x}=\mathbf{a}-(\mathbf{a} \cdot \mathbf{v})\mathbf{v}$  а затем нормализуется  $\mathbf{x}_1=\frac{\mathbf{x}}{\|\mathbf{x}\|}$ . Затем вычисляется второй ортонормированный вектор с помощью векторного произведения двух имеющихся векторов:  $\mathbf{x}_2=\mathbf{v} \times \mathbf{x}_1$ . Окончательный DCM – это  $\mathbf{R}=[\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2,\mathbf{v}]$ , которая является допустимой матрицей поворота.

Интерполяцию можно выполнить с помощью геодезических расстояний или путем преобразования матриц поворота в кватернионы. Кватернион можно вычислить на основе матрицы ориентации и декартовых координат с помощью ее следа (суммы диагональных элементов) и недиагональных элементов. После того как кватернионы будут определены в разных точках и нормализованы, можно создать локально изменяющееся поле направлений, интерполировав кватернионы с помощью метода усреднения собственных значений или других методов, а затем преобразовав эти интерполированные кватернионы обратно в матрицы ориентации и декартовых координат.

#### Реализация облачного и параллельного кода

Можно разработать приложения, использующие параллельные вычисления и доступ к нескольким ядрам, доступным на облачных платформах. Для этого потребуется переработать некоторые части алгоритмов, используемых для оценки и моделирования. Пространственный

поиск для определения условий и обращение матриц (или, в более общем смысле, решение систем уравнений) — два основных узких места с точки зрения времени вычислений. Использование локально изменяющегося анизотропного поиска еще больше усложняет реализацию.

Облачные вычисления позволяют использовать эти модифицированные алгоритмы, чтобы задействовать возможности многопроцессорной обработки и масштабирования при больших требованиях к ресурсам процессора и памяти. Хранилищем, вычислительной мощностью и распределением памяти можно управлять «на лету», чтобы обеспечить выполнение требований к моделированию любого масштаба. Доступны коммерческие сервисы для развертывания программного обеспечения как услуги (SaaS), использующие инфраструктуру для обеспечения безопасности, масштабируемости, быстрого доступа к данным, конфиденциальности, надежности и аварийного восстановления. *Annapurna™ Resource* реализована в облаке и использует многоядерную архитектуру и масштабируемость с точки зрения процессора и памяти для создания моделей значительно быстрее, чем традиционные программные пакеты.

#### Автоматическая оценка параметров

Быстрому созданию множества сценариев может препятствовать необходимость оценки параметров для построения моделей. Эти параметры связаны с решениями по моделированию, которые принимают специалисты и которые требуют определенного уровня экспертных знаний. К счастью, существует обширная документация по распространенным практикам и подходам к определению ключевых параметров моделирования.

Вот несколько доступных решений:

- С выбросами можно бороться с помощью доменного анализа, ограничения содержания, использования высокопродуктивного радиуса влияния этих аномальных образцов или подхода «металл в зоне риска». В приведенном примере в качестве базового варианта используется ограничение содержания с порогом, снижающим содержание металла до 1%. Затем этот параметр изменяется для оценки общего влияния на итоговые запасы.

- Параметры расчета вариограммы, определение ориентации анизотропии и подбор трехмерной модели вариограммы для литокластов могут быть выполнены с учетом размера выборки, расстояния между выборками и ориентации сетки выборки. В данном исследовании параметры расчета определяются на основе расстояния между скважинами и выборками, чтобы обеспечить достаточное количество релевантных пар при любом запаздывании и направлении. Анизотропию можно выявить с помощью карты вариограммы и определения ориентации выпуклой оболочки для определенного значения вариограммы.

- Интерпретация и моделирование вариограмм также являются хорошо зарекомендовавшими себя практиками. Существуют процедуры, позволяющие адаптировать модель к экспериментальным вариограммам.

- Недавнее исследование, посвященное оценке ресурсов, дает представление о текущей практике и помогает принять решение о ключевых параметрах при определении области поиска и других условиях, которые обычно учитываются при оценке. В этом исследовании также рассматриваются параметры классификации минеральных ресурсов.

- Принципы моделирования также хорошо изучены, и многие параметры определяются так же, как и при оценке.

Эти рекомендации можно использовать для автоматической оценки ключевых параметров, необходимых для настройки рабочих процессов оценки и моделирования. Это позволит быстро создавать различные модели, оценивая чувствительность некоторых ключевых параметров.

### ***2.3. Применяемые методы.***

Анализ проводился с использованием керна буровых скважин, а образцов, представляющих различные геологические образования, смоделированные геологической группой проекта. Эти геологические образования были добавлены в базу данных для сравнения. Кроме того, данные были разделены на сектора, как описано выше, но с использованием буфера для включения образцов, расположенных близко к каждому сектору, но выходящих за пределы объема, представленного твердым телом. Эти окружающие образцы позволили получить контекст для комплексной интерпретации минерализации во всем районе, обеспечив согласованность модели при переходе от одного сектора к другому.

#### *Постулаты геологической модели*

Исследовательский анализ данных для проверки предположений, сделанных при геологической интерпретации, включал в себя следующее:

- Создание таблиц сопряженности между смоделированными геологическими объектами (минерализация, изменения и литология) и зарегистрированными свойствами образцов.

- Описательная статистика и графические отображения для анализа распределений и взаимосвязей между атрибутами, включая точечные диаграммы, логарифмические графики вероятности и «ящики с усами».

- Расчет вариограммных карт для определения общей анизотропии геологических рудных тел и их сопоставления с результатами интерпретации.

### Сценарий геологической модели

Для одного из участков была создана альтернативная геологическая модель с использованием индикаторного кригинга (ИК) для сравнения с исходной интерпретированной моделью, предоставленной геологической группой. Основное методологическое отличие заключается в том, что геологическая непрерывность и протяженность пласта определяются непосредственно на основе данных из скважин, без привлечения геологических специалистов. Этот подход, основанный на данных, дополнен использованием локальной анизотропии и последующим сглаживанием для обеспечения геологической достоверности полученной модели. ИК генерирует карты вероятностей для каждой геологической области, что помогает выявить слабые места в исходной модели, где данные не подтверждают ее, а также другие возможные улучшения.

В рамках этого тематического исследования геологическое моделирование не проводилось из-за крайне неравномерной доступности данных в разных районах. Основная цель компании Codelco состояла в том, чтобы выявить слабые места в геологической интерпретации данных для дальнейших действий по их сбору. Тем не менее в будущих расширениях этой работы можно было бы рассмотреть возможность моделирования геологической модели.

### Сценарии оценки модели

Модели оценки запасов были составлены с учетом текущей геологической интерпретации. Изначально использовался однофакторный подход, при котором каждый элемент оценивался и моделировался независимо. Это распространенная практика, но у нее есть недостаток: она не учитывает взаимосвязи между переменными (в данном случае — запасами), что снижает точность последующей экономической оценки, которая может существенно измениться при учете корреляции между основным элементом, представляющим экономический интерес (Cu), и потенциальными побочными продуктами (Mo, Au, Ag), а также вредными элементами (As).

Для оценки концентрации пяти элементов: золота (Au), серебра (Ag), мышьяка (As), меди (Cu) и молибдена (Mo) — были созданы одномерные модели с ограничениями по областям оценки. Для анализа их влияния на результаты было применено несколько методов оценки. Среди них были следующие:

- Взвешивание по обратному расстоянию в степени три (IDW3);
- Обычный кригинг (OK); и
- Ближайшего соседа (NN).

Неопределённость была количественно оценена с помощью последовательного гауссовского моделирования (Sequential Gaussian Simulation, SGS), применённого независимо

к каждой переменной содержания. Для повышения качества и надёжности оценок были проведены исследования чувствительности, включающие выявление и обработку выбросов, декластеризацию для устранения эффекта предпочтительной выборки, анизотропии и моделирование вариограмм для учёта пространственной структуры. Эти модели были сопоставлены для основного элемента (меди) с помощью кривых содержания в тоннах и диаграмм, чтобы определить влияние различных решений, принятых при моделировании, и таким образом выявить ключевые решения, которые влияют на итоговые ресурсы.

#### Сценарии избирательности

Чувствительность к размеру блока была изучена путем сравнения результатов независимого моделирования каждого пласта на исходной блочной модели размером  $20 \times 20 \times 10$  м<sup>3</sup> с результатами нового цикла независимого моделирования на модели с более высоким разрешением, с использованием блоков размером  $10 \times 10 \times 10$  м<sup>3</sup>. Это позволило определить влияние размера блока на извлекаемые ресурсы.

#### Влияние многомерных взаимосвязей

Один из ключевых вопросов заключался в том, нужно ли использовать многомерное моделирование для ресурсной модели, учитывая дополнительную сложность по сравнению с независимым моделированием. Решение об использовании многомерного моделирования зависит от целей ресурсной модели и предполагаемого типа постобработки. Если блочная модель будет подвергаться постобработке с использованием двух или более интересующих нас элементов, крайне важно оценить, требуется ли воспроизведение двумерных или многомерных распределений в каждой реализации. Это особенно важно для такого анализа, как Net Smelter Return (NSR), который зависит от взаимодействия между этими элементами.

#### Анализ результатов

Для сравнения результатов, полученных с помощью различных методов оценки, и выявления существенных различий в количественной оценке ресурсов были построены кривые распределения по тоннажу. Эти сводки составлялись только для участков, расположенных на расстоянии менее 150 м от ближайшей пробуренной скважины, чтобы учитывать только те ресурсы, в отношении которых можно с достаточной уверенностью делать выводы.

#### Краткое описание разработанных моделей

Краткое описание всех выполненных предварительных процессов представлено в таблице 1. Несколько моделей, построенных с разным разрешением, для разных элементов и с использованием разных методов, сведены в таблицу 2. Необходимые постпроцессы, позволяющие оценить влияние различных решений на извлекаемые ресурсы, превышающие предварительный порог, представлены в таблице 3.

Табл. 1.

**Краткое описание этапов предварительной обработки.**

| Preprocessing Activities  |   |
|---|---|
| EDA/Compositing/Database consolidation  | ☑ |
| Definition of estimation domains for Ag, Au, As and Mo through contact analysis using the mineralization zones defined for Cu | ☑ |
| Review of geological model and recommendation of domains for Ag, Au, As and Mo  | ☑ |

Табл. 2.

**Сводка по созданным моделям.**

| Model Construction Activities |  |           |          |    |    |    |    |
|-------------------------------|--|-----------|----------|----|----|----|----|
| Block Model Size              | Up to 20 Domains per Sector                        |           | Elements |    |    |    |    |
|                               | Model  | Method    | Cu       | Ag | Au | As | Mo |
| 20 × 20 × 10                  | Univariate   | NN        | ☑        | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |
|                               |  | IDW-3     | ☑        | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |
|                               |  | OK        | ☑        | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |
|                               |  | SGS       | ☑        | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |
| 10 × 10 × 10                  | Univariate   | OK        | ☑        | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |
|                               |  | SGS       | ☑        | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |
| 20 × 20 × 10                  | Multivariate (+imputation)                         | PPMT-SGS  | ☑        | ☑  | ☑  | ☑  | ☑  |
| 20 × 20 × 10                  | Classification                                     | DHS       |          |    | ☑  |    |    |
|                               | Drillhole placement recommendation                 | DHS + SGS |          |    | ☑  |    |    |
| 20 × 20 × 10                  | Geological model + grade estimation                | IK<br>OK  | ☑        | ☐  | ☐  | ☐  | ☐  |
| 20 × 20 × 10                  | Grade estimation 3 strategies                      | OK        | ☐        | ☐  | ☑  | ☐  | ☐  |
| 20 × 20 × 10                  | Grade estimation capping and high-yield strategies | OK        | ☐        | ☐  | ☑  | ☐  | ☐  |

Табл. 3.

**Краткое описание действий по постобработке.**

| Postprocessing Activities  |   |
|--|---|
| Validation and volumetric calculations (grade tonnage curves, swath plots) | ☑ |
| Model comparisons and analysis of results                                  | ☑ |

**3. Исследование медно-порфировой системы Сан-Антонио-Потрерильос.****3.1. Расположение и геологическое описание.**

Медно-порфировая система Сан-Антонио-Потрерильос с молибденом и серебром расположена в металлогеническом поясе медно-порфировых м-ний в системе разломов Домейко, Центральные Анды, Чили, примерно в 1100 км к северу от Сантьяго и в 125 км к востоку от Чаньяраля. Район представляет собой сложную геологическую среду, сформировавшуюся в результате множества наложившихся друг на друга процессов минерализации, что привело к неоднородному распределению исследуемых элементов: меди (Cu), молибдена (Mo), золота (Au), серебра (Ag) и мышьяка (As). Район разделен на четыре основных сектора: Мина-Вьеха (MV) в центральной части, Порфидо-Гонсалес (PG) на юге, Порфидо-Норте (PN) в северной части и Матераль-Кебрадо (MQ), который представляет собой

просадочный кратер, образовавшийся в результате старых горных работ в районе Мина-Вьеха (рис. 1).

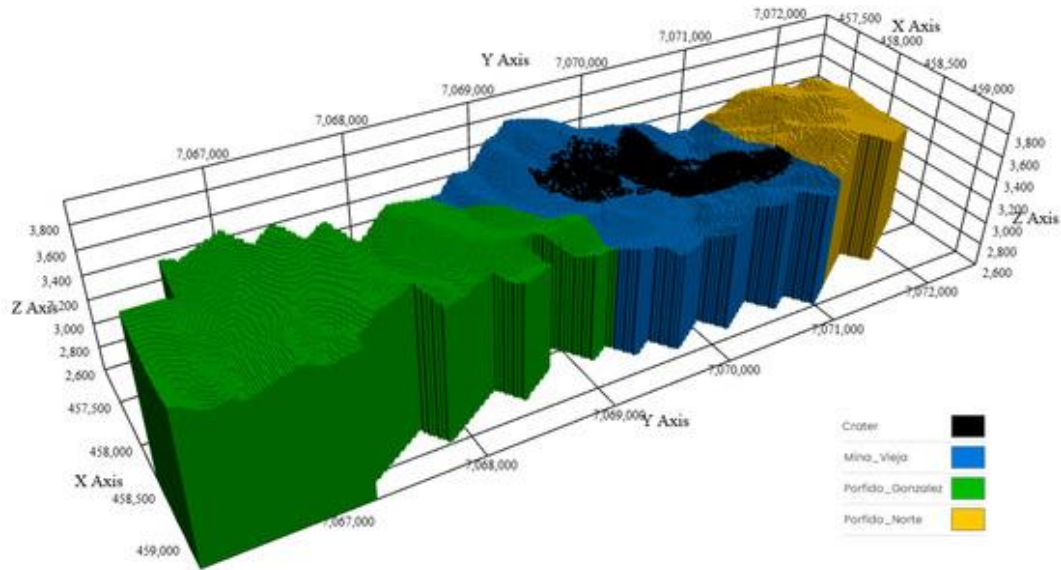


Рис. 1 Визуализация блочной модели с изображением четырех основных секторов.

Проект расположен на морском осадочном плато, геологический возраст которого варьируется от келловейского до неокомского яруса. В этом районе выделяют три формации: Асьентос, Педерналес и Агуа-Элада. Эти формации прорваны тремя минерализованными телами: Порфидо-Норте, Порфидо-Гонсалес и Порфидо-Кобре, где в начале XX века велась добыча полезных ископаемых, ныне известная как Мина-Вьеха (рис. 2).

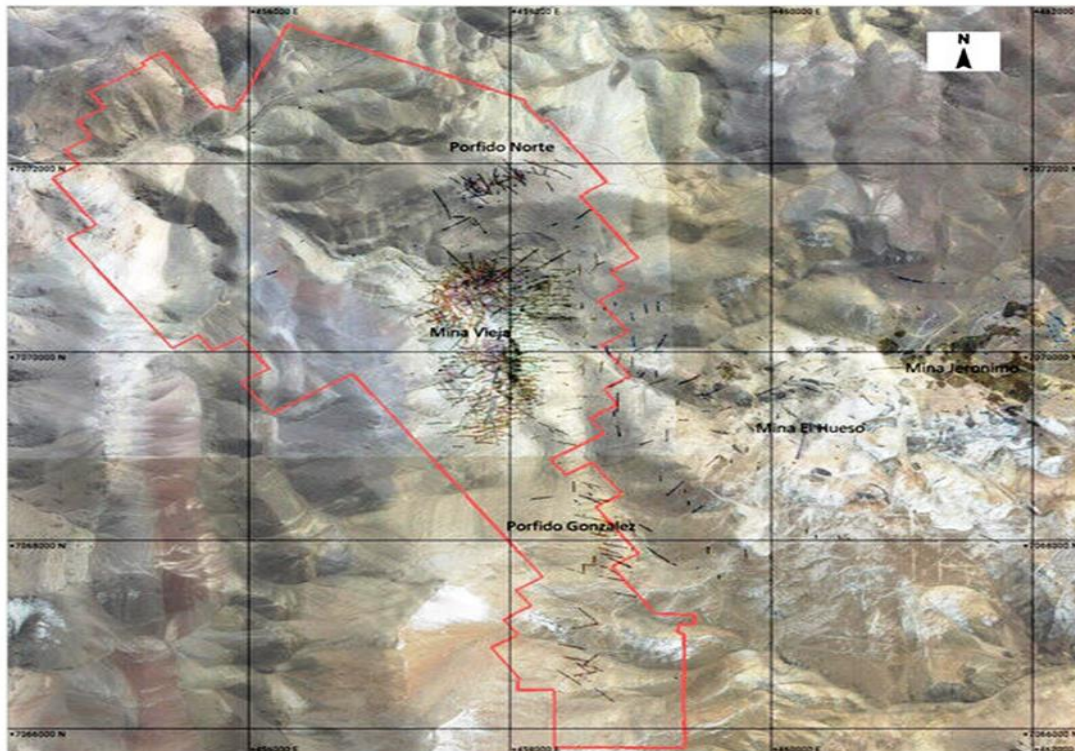


Рис. 2 Карта рудного района Сан-Антонио — Потрерильос, участок Коделко обозначен красной линией.

Для района Потрерильос характерно сочетание м-ний меди (Мина-Вьеха) и золота (Эль-Уэсо и Агуа-де-ла-Фальда). В районе Мина-Вьеха встречаются порфиры с внутриминеральной медной минерализацией и сопутствующей минерализацией молибдена, мышьяка, золота и серебра.

### 3.2. Доступные данные.

Представлены геологические интерпретации литологии, зон изменений, основных структур и зон минерализации. Данные, использованные для создания геологических моделей литологии, зон изменений и минерализации, обобщены в таблице 4.

Табл. 4.

Сводная информация для геологической интерпретации.

| Sector                | Lithological Model |                | Alteration Model |                | Mineralization Model |                |
|-----------------------|--------------------|----------------|------------------|----------------|----------------------|----------------|
|                       | Drillholes         | Meters         | Drillholes       | Meters         | Drillholes           | Meters         |
| Porfido Norte (PN)    | 63                 | 17,557         | 47               | 14,313         | 50                   | 15,112         |
| Mina Vieja (MV)       | 1045               | 183,227        | 616              | 81,863         | 468                  | 84,062         |
| Porfido Gonzalez (PG) | 71                 | 17,021         | 69               | 15,964         | 77                   | 18,634         |
| <b>Total</b>          | <b>1179</b>        | <b>217,805</b> | <b>732</b>       | <b>112,140</b> | <b>595</b>           | <b>117,808</b> |

Интерпретация проводилась на основе разрезов и планов различных участков, а также геологических карт и интерпретаций.

К основным литологическим типам относятся различные порфиры, андезиты, песчаники, осадочные породы, гидротермальные брекчии, кальцилотиты, кальциты и скарны. Типы изменений включают глинизацию, аргиллизацию, кварц-серицитизацию, силикатизацию, скарнизацию, калиевый фон, карбонаты и хлориты. Основной разлом — разлом Эральдо, но есть и другие крупные структуры, такие как Силика-Роха, Дескуите и Сан-Антонио. Это малоугловые разломы, которые определяют форму порфировых пород. Единицы минерализации моделируются в соответствии с распределением содержания меди и идентифицируют выщелачиваемые (ESE—вторичное обогащение, смешанные, OXN—черные оксиды, OXV—зеленые оксиды, далее разделенные на высокосернистые OXV\_ALEY и низкосортные OXV\_BLEY в PN) и сульфидные единицы (CPY—халькопирит, CPY-BO—халькопирит борнит, CPY—EN—халькопирит энаргит, CPY—PY—халькопирит пирит, HS—высокое сульфидирование, PY -пирит, и PY—CPY—пирит > халькопирит). Сводная информация представлена в таблице 5. Определенные на сегодняшний день области оценки связаны с зонами минерализации.

**Краткое описание геологических формаций,  
смоделированных с учетом минерализации, литологии и изменений.**

| Mineralization |                         | Lithology |                      | Alteration |                     |
|----------------|-------------------------|-----------|----------------------|------------|---------------------|
| CPY            | Chalcopyrite            | AND       | Andesite             | AA         | Advanced Argillic   |
| CPY-BO         | Chalcopyrite + Bornite  | ARE       | Sandstone            | ARG        | Argillic            |
| CPY-EN         | Chalcopyrite + Enargite | BXH       | Hydrothermal Breccia | CAR        | Carbonation         |
| CPY-PY         | Chalcopyrite + Pyrite   | CLT       | Calcilutite          | CL_M       | Marginal Chloritic  |
| ESE            | Secondary Enrichment    | CAL       | Calcite              | QSER       | Quartz Sericite     |
| HS             | High Sulfidisation      | PC        | Porphyry Cobre       | K          | Potassic            |
| LIX            | Leached                 | PE        | Porphyry Esmeralda   | KF         | Potassic Background |
| MIX            | Mixed                   | PG        | Porphyry Gonzalez    | SIL        | Silicification      |
| OXN            | Black Oxides            | PH        | Porphyry Hueso       | SKN        | Skarn               |
| OXV            | Green Oxides            | PN        | Porphyry Norte       |            |                     |
| OXV_ALEY       | High Grade Green Oxides | PS        | Porphyry Secreto     |            |                     |
| OXV_BLEY       | Low Grade Green Oxides  | SED       | Sediments            |            |                     |
| PY             | Pyrite                  |           |                      |            |                     |
| PY-CPY         | Pyrite > Chalcopyrite   |           |                      |            |                     |

Базы данных образцов из буровых скважин доступны для пластов PG + MV в виде интегрированного набора данных, а для пласта PN — в виде отдельного набора. Для создания интерпретированных геологических моделей использовались исходные образцы. Типичная длина образцов составляла 2 м, была выбрана в качестве композитной длины для моделирования пластов. Композитность достигается за счет разделения композитов по оценочным областям. Композиты длиной менее 1 м были исключены. Их доля составляет менее 2% от общего числа композитов.

Эта модель включает 52 685 точек исходных данных, более 5 млн блоков, дискретизацию 2 на 2 на 2, пять химических элементов и 21 область оценки. Модели были рассчитаны с использованием блочной модели размером 20×20×10 м<sup>3</sup>.

В таблице 6 указано количество композитов размером 2 м в каждой основной зоне. Композит разбивался на части в зависимости от области оценки, при этом композиты длиной менее 1 м удалялись.

**Доступные композитные материалы в зависимости от переменной и отрасли.**

|            | Composites<br>MV + PG | Composites PN |
|------------|-----------------------|---------------|
| Ag         | 14,976                | 5040          |
| As         | 8386                  | 4374          |
| Au         | 14,621                | 6337          |
| Cu         | 34,139                | 8820          |
| Mo         | 12,523                | 4474          |
| Domain     | 43,865                | 8820          |
| Drillholes | 489                   | 58            |

### 3.3. Оценка геологической модели.

На этом этапе целью является оценка статистических и пространственных взаимосвязей между различными элементами и геологическими особенностями, а также улучшение понимания геологических факторов, влияющих на минерализацию.

Процесс моделирования начинается с отнесения образцов к интерпретированным геологическим телам, представляющим типы минерализации, литологию и изменения. Это позволило выявить некоторые несоответствия между картируемыми интервалами скважин и интерпретированными трехмерными объемами, особенно в оксидных зонах месторождения Порфидо-Норте (PN). Например, до 30% образцов, относящихся к телу OXV\_ALEY, были отнесены к другим телам, что указывает либо на геометрическую погрешность при картировании тела, либо на неточность данных каротажа (рис. 3).

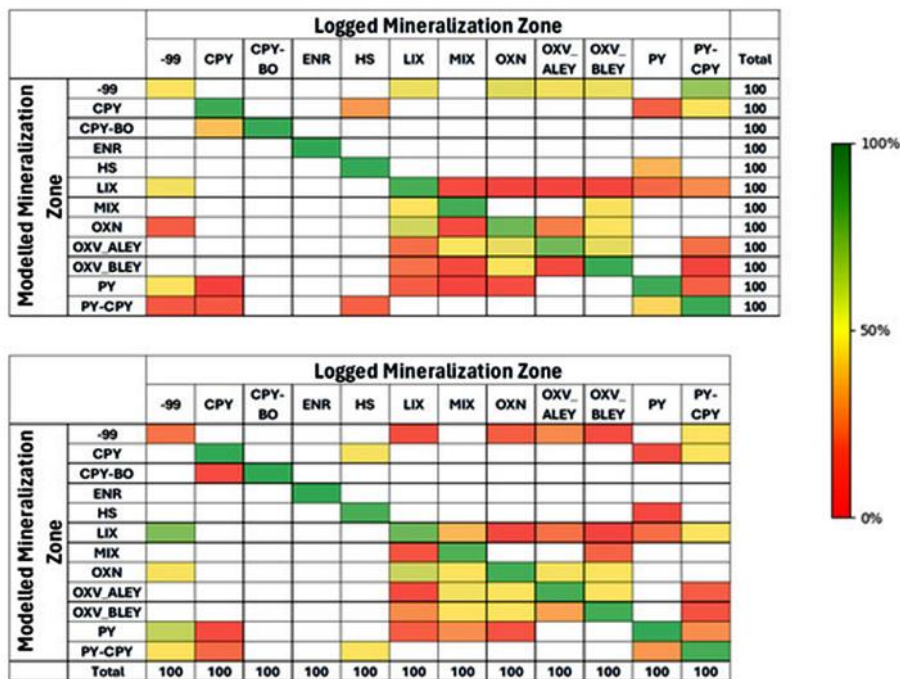


Рис. 3 Пример таблицы сопряженности для анализа согласованности данных каротажа и интерпретированной геологической модели.

Выявление этих различий побудило провести анализ этой области модели. В остальном модели показали высокую точность в определении различных порфировых пород, вмещающей породы и гидротермальной брекчии.

В верхней таблице показана ошибочная классификация модели (с учетом присвоенного домена, что было зарегистрировано), а в нижней — восстановление модели (с учетом зарегистрированного домена, как он был смоделирован).

Сходство в распределении содержания полезных ископаемых между различными секторами изначально оценивалось путем расчета среднего содержания и стандартного

отклонения по зонам минерализации для каждого из секторов и каждого из пяти элементов, а также путем построения соответствующих графиков логарифмической вероятности (рис. 4).

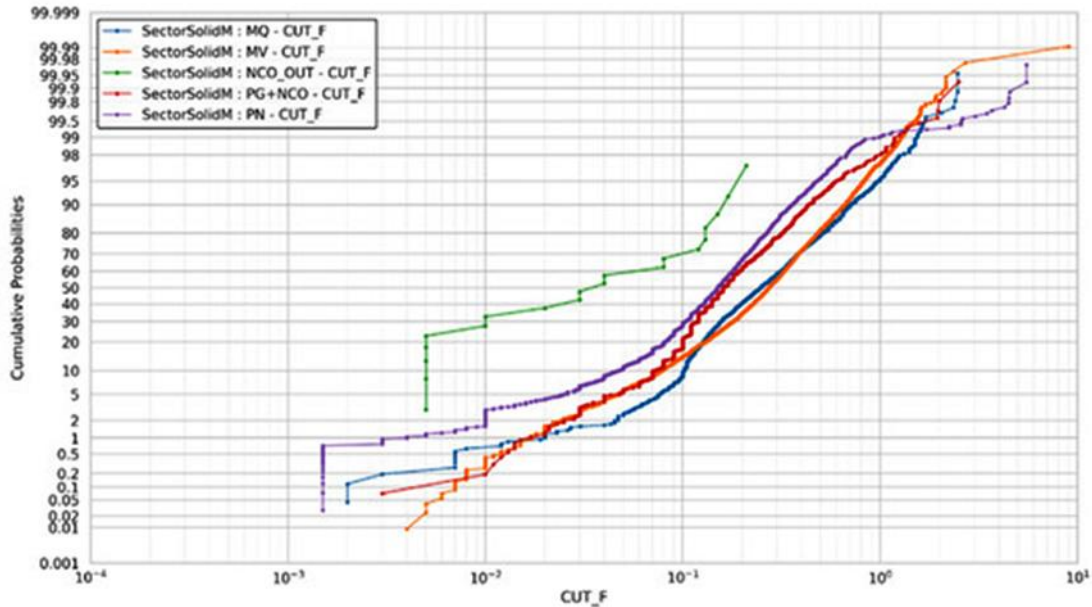


Рис. 4 Примеры графиков логарифмической вероятности для меди (%) в области оксидов переходных металлов.

Каждая кривая представляет распределение в одном из секторов. Корреляции были проанализированы по секторам и для различных пар элементов. Результаты показывают, что сила взаимосвязи зависит от сектора и области. Это подтверждает идею о том, что процессы первичной, высокосернистой и вторичной минерализации различаются в трёх основных секторах (первичный, средне- и позднепервичный). На рисунке 5 показан пример анализа корреляций между элементами в зависимости от сектора и области.

| ZMIN       | CuvsMo | CuvsAu | CuvsAg | AuvsAg | CuvsAs |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>OKV</b> |        |        |        |        |        |
| MV         | 0.01   | 0.37   | 0.53   | 0.13   | 0.09   |
| PG         | 0.46   | -0.05  | -0.03  | 0.46   | -0.09  |
| PN         | 0.13   | 0.54   | 0.61   | 0.69   | 0.21   |
| <b>OQN</b> |        |        |        |        |        |
| MV         | 0.16   | 0.07   | 0.02   | 0.13   | 0.43   |
| PG         | 0.06   | 0.14   | 0.1    | 0.11   | 0.1    |
| PN         | 0.3    | 0.58   | 0.33   | 0.35   | 0.14   |
| <b>HIX</b> |        |        |        |        |        |
| MV         |        |        |        |        |        |
| PG         | 0.16   | 0.04   | -0.04  | -0.01  | 0.06   |
| PN         | -0.12  | 0.34   | 0.65   | 0.51   | 0.12   |
| <b>ESE</b> |        |        |        |        |        |
| MV         | -0.01  | 0.14   | 0.24   | 0.43   |        |
| PG         | 0.2    | 0.03   | 0.04   | 0.15   | 0.12   |
| <b>HS</b>  |        |        |        |        |        |
| PN         | 0.21   | -0.06  | 0.27   | 0.43   | 0.18   |
| <b>LIX</b> |        |        |        |        |        |
| MV         | 0.14   | -0.02  | -0.01  | 0.47   | 0.05   |
| PG         | 0.29   | 0.07   | 0.03   | 0.21   | 0.22   |
| PN         | 0.15   | 0.35   | 0.06   | 0.45   | -0.09  |

| ZMIN          | CuvsMo | CuvsAu | CuvsAg | AuvsAg | CuvsAs |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>CPY</b>    |        |        |        |        |        |
| MV            | -0.06  | 0.03   | 0.53   |        | 0.61   |
| PG            |        | -0.01  | 0.35   | -0.27  |        |
| PN            | 0.12   | 0.48   | 0.33   | 0.25   | -0.06  |
| <b>CPY-BO</b> |        |        |        |        |        |
| PN            |        |        |        |        |        |
| <b>CPY-EN</b> |        |        |        |        |        |
| MV            | 0.2    | -0.06  | 0.47   | 0.01   | 0.58   |
| <b>CPY-PY</b> |        |        |        |        |        |
| MV            | 0.09   | -0.01  | 0.04   |        | 0.51   |
| <b>PY-CPY</b> |        |        |        |        |        |
| MV            | 0.53   | -0.03  | 0.1    | 0.1    | 0.64   |
| PG            | 0.23   | 0.05   | 0.35   | 0.12   | 0.36   |
| PN            | 0.26   | 0.34   | 0.4    | 0.38   | -0.11  |
| <b>PY</b>     |        |        |        |        |        |
| MV            | 0.4    | 0.02   | 0.1    | 0.27   | 0.43   |
| PG            | 0.43   | 0.1    | 0.09   | 0.27   | 0.19   |
| PN            | 0.35   | 0.14   | 0.3    | 0.38   | -0.05  |

Рис. 5 Пример анализа коэффициента корреляции по доменам и секторам, позволяющий выявить различия в интерпретации каждого сектора (жирный шрифт - достоверные значения корреляции, цвета от теплого к холодному - диапазон от самой низкой до самой высокой корреляции).

Это одни из исходных данных, на основе которых принимается решение о том, какие данные следует объединить для последующей оценки и моделирования. Анализ был дополнен

подробным изучением графиков логарифмической вероятности, которые позволяют выявить разрывы в распределении, а также диаграмм рассеяния, которые позволяют проанализировать изменения в двумерных взаимосвязях между секторами и областями. Это подтверждает рекомендацию о том, что моделирование должно проводиться отдельно по секторам с учётом корреляции между элементами, которые, вероятно, оказывают значительное влияние на экономическую ценность, из-за потенциальной надбавки, связанной с содержанием молибдена, золота и серебра, и штрафов за содержание мышьяка. Были изучены методы контроля вторичных элементов (молибдена, золота, серебра и мышьяка), которые показали свою ограниченность из-за типа доступной информации, не позволяющей глубже понять геологические процессы, связанные с отложением этих элементов. Для более глубокого анализа потребуются дополнительные геологические исследования. Несмотря на эти ограничения, были даны рекомендации по возможному улучшению определения областей оценки. Таблица 7 содержит рекомендуемые группировки, составленные на основе проведенного статистического анализа.

Табл. 7.

**Геологические критерии для определения доменов по секторам и рекомендации.**

|                       | <b>PN</b>   | <b>PG</b>   | <b>MV</b>   |
|-----------------------|---|---|---|
| <b>Mineralization</b> | PY + LIX<br>PY-CPY<br>OXN + MIX<br>CPY + CPY-BO + HS + ESE<br>OXV_ALEY + OXV_BLEY | PY + LIX<br>PY-CPY<br>OXN + MIX<br>CPY + ESE<br>OXV   | PY + LIX<br>PY-CPY<br>OXN + MIX<br>CPY + CPY-EN + HS + ESE<br>OXV |
| <b>Lithology</b>      | PN + BXH<br>AND + ARE + CLT + SED   | PG + BXH<br>AND + ARE + CAL + CLT +<br>SED<br>PH + PE | PC<br>BXH<br>AND + CAL + CLT + SED<br>PS + PE                     |
| <b>Alteration</b>     | CAR + CL_M + SKN<br>AA + ARG + QSER + K + KF + SIL                                | AA + CAR + CL_M + SKN<br>ARG + QSER + SIL             | AA + CAR + CL_M + SKN<br>ARG + QSER + K + KF + SIL                |
| <b>Recommendation</b> | Min + Lith  | Min + Lith  | Min + (Lith + Alt)  |

Предлагается добавить литологию в качестве дополнительного фактора, влияющего на зоны минерализации. В случае с рудником Мина-Въеха (MV) литология и изменения имеют большое значение, но их влияние на содержание меди во многом пересекается.

Основной вывод этого анализа заключается в том, что три основных сектора (MV, PN, PG) не должны включать в себя образцы, отобранные в одной и той же минералогической зоне, поскольку распределение минералов в них существенно различается. Сектор MQ, соответствующий обломочному материалу из зон проседания, смоделирован отдельно, поскольку геологические особенности этого материала не изучены.

### 3.4. Сценарии геологической модели

Альтернативный сценарий для сектора Порфидо-Норте (PN) был создан с помощью индикаторного кригинга с использованием локально изменяющейся анизотропии для отображения непрерывности различных областей. Генерация локально изменяющихся направлений показана на рисунке 6 для одной из областей (OXN).

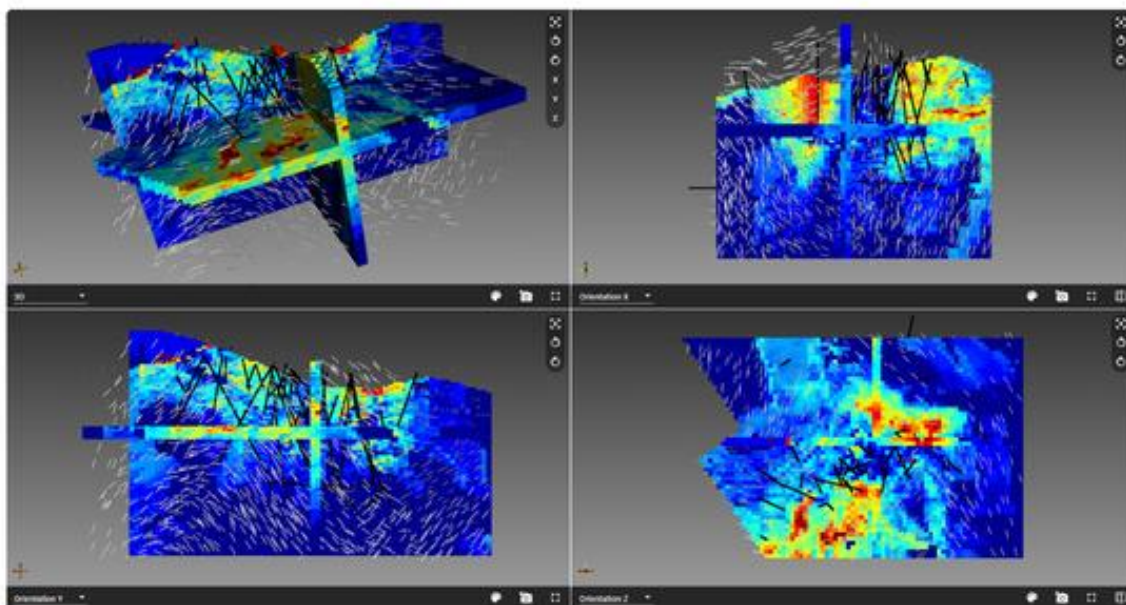


Рис. 6 Локально изменяющиеся направления (показаны в виде векторов), сгенерированные для элемента OXN, для интерполяции вероятности обнаружения OXN (показано в цветовой шкале: синий = 0, красный = 1) с помощью индикаторного кригинга. Аналогичные поля были созданы для всех остальных областей.

Эти направления отражают локальную непрерывность индикаторной переменной, которая указывает на наличие той или иной категории в каждой точке блочной модели. Затем с помощью индикаторного кригинга (ИК) оценивается вероятность обнаружения каждой из зон минерализации (доменов) в каждой точке модели. Пространственное распределение (гладкость и непрерывность) этих доменов, а также их протяженность за пределами участков отбора проб определяются диапазонами индикаторных вариограмм для каждой категории. Полученную модель можно сравнить с исходной интерпретацией (рис. 7), и она позволяет выявить области со значительными различиями.

Эти участки сопряжены с повышенным риском с точки зрения последующей оценки содержания полезных ископаемых. Альтернативная модель сохраняет геологическую изменчивость, что крайне важно для оценки ресурсов на ранних этапах, и повышает точность определения целевых участков в зонах с высокой степенью неопределенности. Эта модель, основанная на индикаторном кригинге (ИК), предоставляет геологической группе информацию о возможных колебаниях в оценке тоннажа, содержания полезных ископаемых и металла выше

предварительных пороговых значений, что позволяет принимать дальнейшие решения о сборе данных и корректировке интерпретируемой модели.

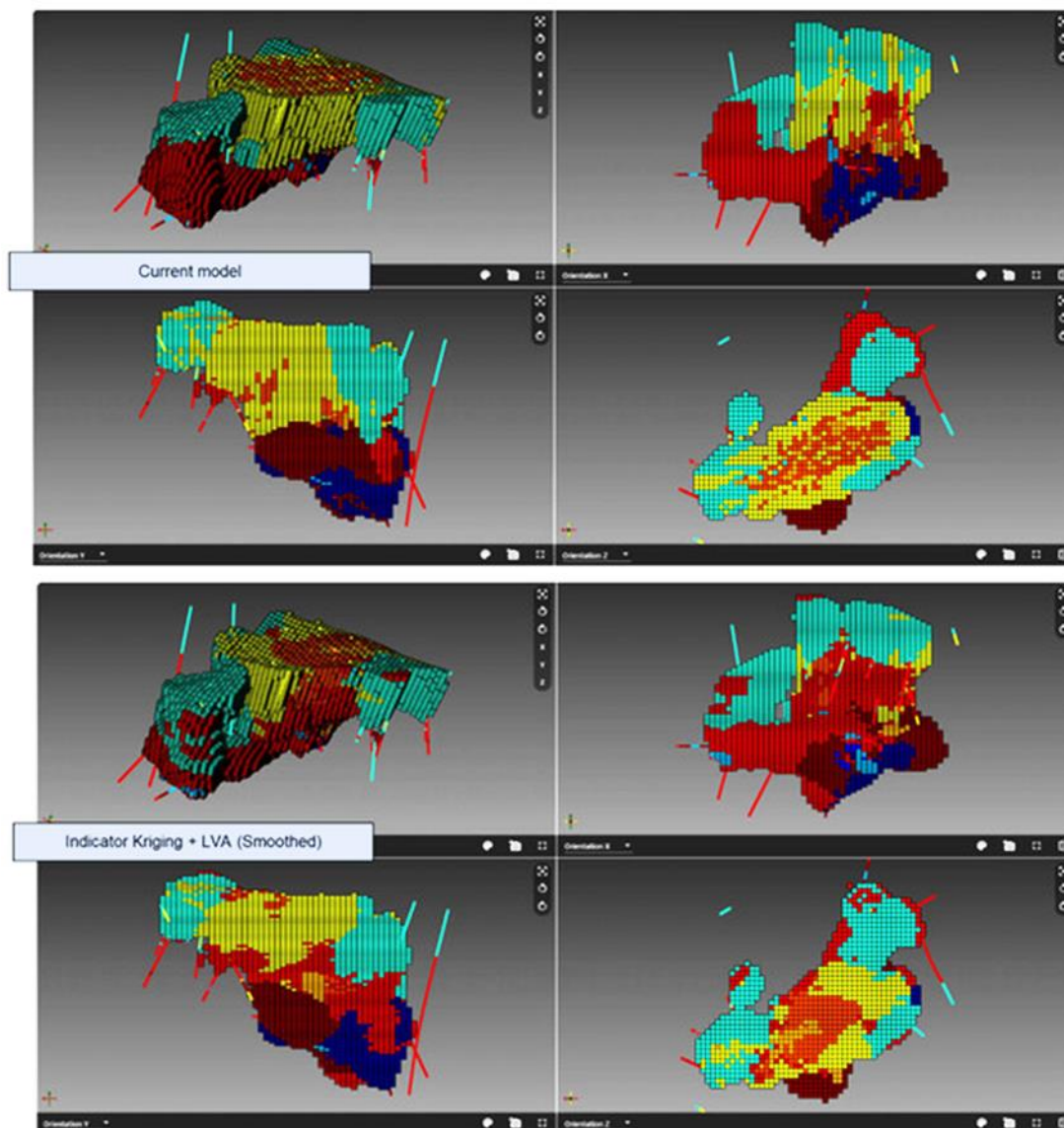


Рис. 7 Визуализация интерпретированной модели (изометрическая проекция и проекции на три главные оси координат) (вверху) и модели, полученной с помощью ИК с использованием LVA (внизу).  
(каждый цвет обозначает область оценки, блоки имеют размер 20 м по оси X, 20 м по оси Y и 10 м по оси Z).

Сравнение текущей модели с моделью ИК показало, что абсолютная разница в содержании меди выше порогового значения составляет 4,4%, в тоннаже выше порогового значения — 16,1%, а в содержании металла выше порогового значения — 18,9% при пороговом значении 0,2% Cu.

В обоих случаях разница заключается только в площади геологических тел. При этом используется один и тот же метод оценки содержания меди с помощью обычного кригинга (ОК) и учитываются только блоки в радиусе 150 м от источника данных. Это говорит о том, что для

геологической интерпретации было бы полезно провести дополнительное бурение, чтобы устранить этот источник неопределённости.

### 3.5. Оценки и сценарии для модели *Grades*.

Как указано в таблице 2, было построено несколько моделей с использованием различных методов оценки. К ним относятся обычный кригинг (ОК), метод обратных расстояний в степени 3 (MOP3), метод ближайших соседей (МНС) и одномерные модели с использованием фиксированных единиц минерализации в качестве областей оценки. Эти модели построены на основе текущей модели ( $20 \times 20 \times 10$  м<sup>3</sup>). Метод ближайших соседей полезен для определения декластеризованного распределения содержания полезных ископаемых в каждой области. Моделирование позволяет количественно оценить риск, связанный с заявленной сортностью и тоннажем выше порогового значения, а также выявить области с большей неопределенностью, которые могут потребовать дополнительного сбора или анализа данных. Модели можно легко сравнить с помощью кривых зависимости сортности от тоннажа (рис. 8), хотя основное назначение этих моделей — выявление областей со значительными пространственными различиями и определение их причин, которые зависят от конкретного участка в районе, включая ограниченность выборки, качество образцов, интерпретацию, допущения и параметры, используемые при интерполяции. Аналогичный анализ изменения извлекаемых ресурсов выше предельного значения был проведен с помощью моделирования на блочной модели с размером ячейки  $10 \times 10 \times 10$  м<sup>3</sup>, чтобы точнее спрогнозировать влияние избирательности на потенциальную рентабельность объекта.

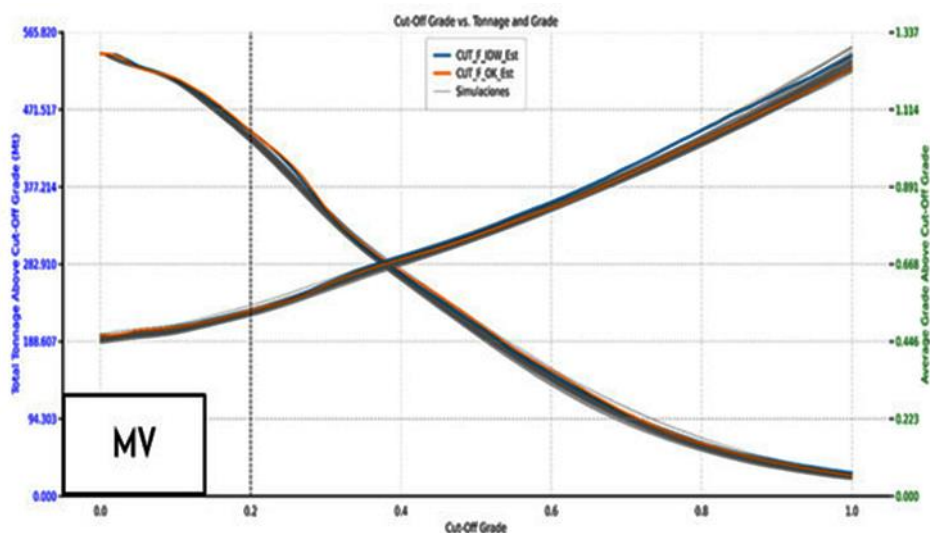


Рис. 8 Пример сравнения кривой градации по тоннажу для рудника Мина-Вьеха (MV) по меди (%).

Значительное внимание в исследовании было уделено оценке достоверности и влияния многомерного моделирования. В зонах, где корреляция между медью и золотом, а также медью и серебром была статистически умеренной (особенно в районе Пильского м-ния), учет этих

корреляций может существенно повлиять на результаты, особенно при определении экономической ценности блоков, рассматриваемых как рудные. Было применено моделирование с использованием многомерного преобразования методом проекционного поиска (Projection Pursuit Multivariate Transformation, PPMT), позволяющее учесть многомерную структуру, заданную комплексными данными (рис. 9), и воспроизвести нелинейные связи между элементами без искажений.

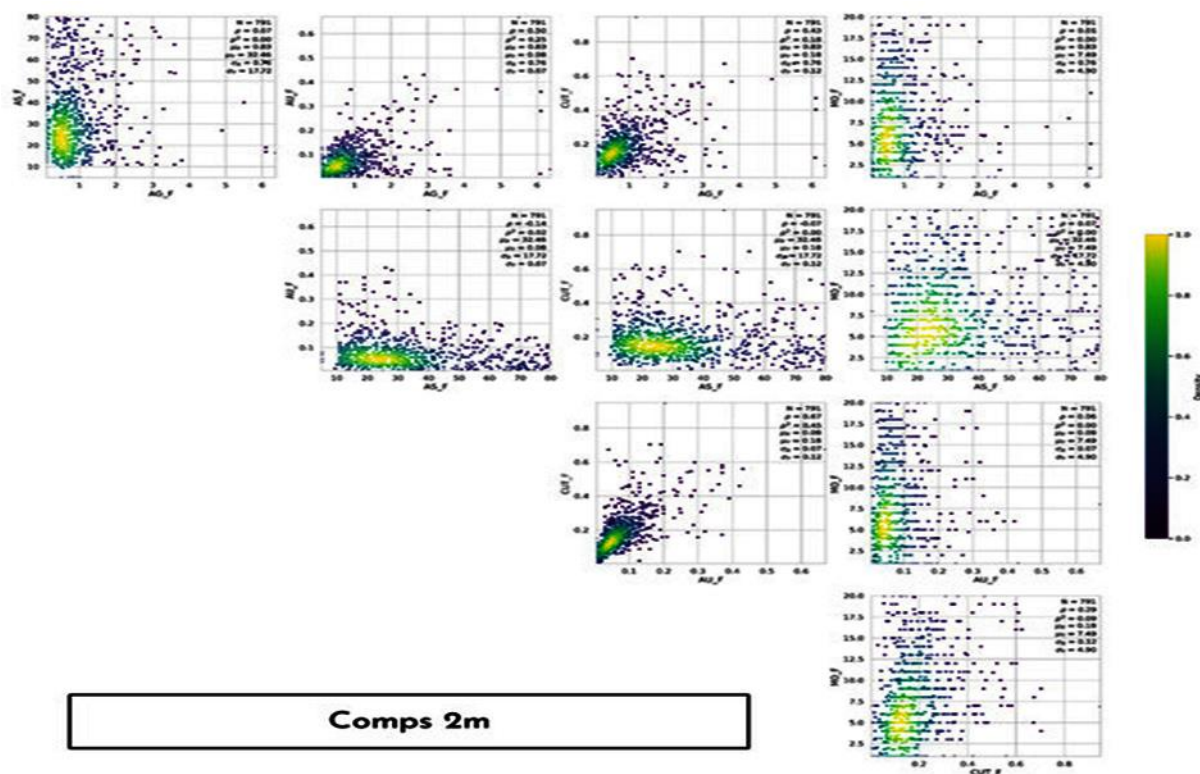


Рис. 9 Матрица двумерных точечных диаграмм — композиты.

PPMT декоррелирует многомерное распределение с помощью прямого итеративного преобразования в гауссово распределение, что позволяет независимо моделировать эти компоненты. Затем эти смоделированные факторы преобразуются обратно в исходные переменные путем обращения итеративных преобразований, примененных ранее. Обратное преобразование сохраняет как предельные распределения, так и многомерные взаимосвязи (рис. 10), что приводит к более геологически правдоподобным пространственным закономерностям и более точным оценкам эквивалентного содержания металлов.

Эти результаты позволили получить практические наработки для дальнейшего развития проекта. Например, в проекте PN использование PPMT и SGS показало, что концентрация золота и меди высокого качества ограничена строже, чем предполагалось ранее. Разницу с результатами независимого моделирования элементов можно увидеть, сравнив рис. 10 с рис. 11.

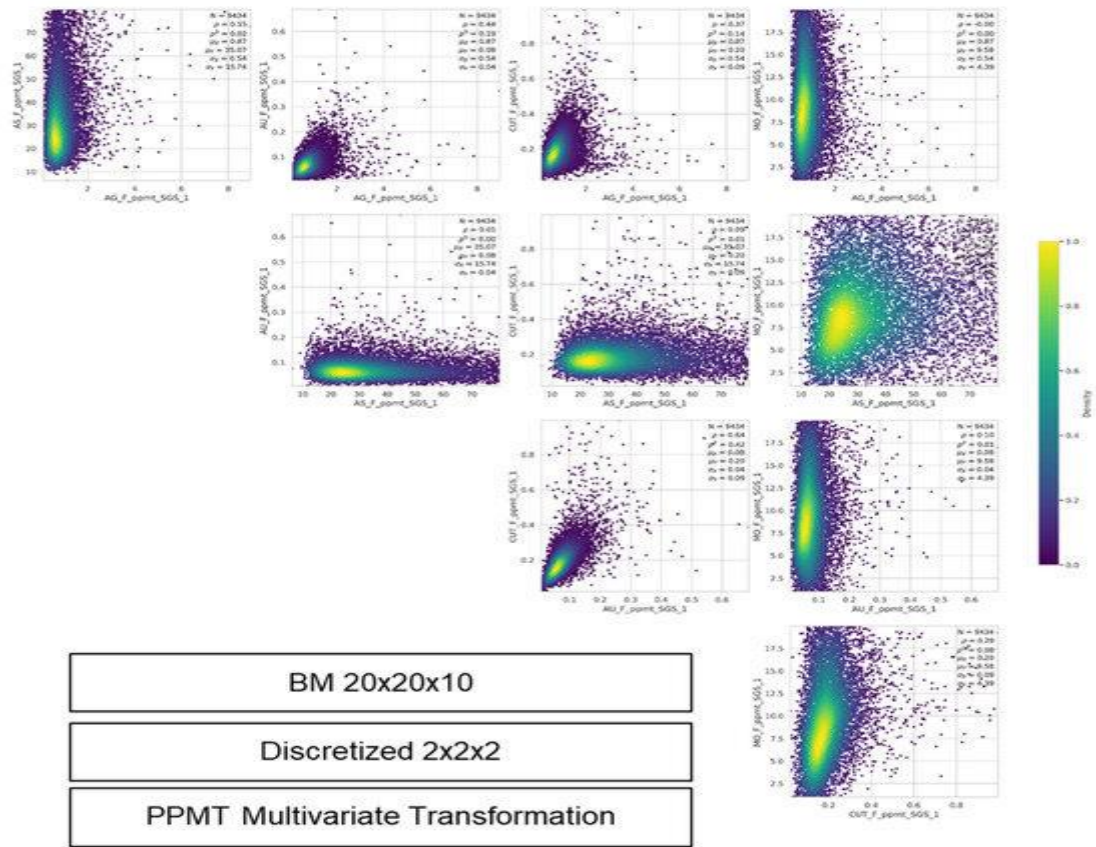


Рис. 10 Двумерная матрица точечных диаграмм рассеяния — точки, смоделированные с помощью PPMT-SGS.

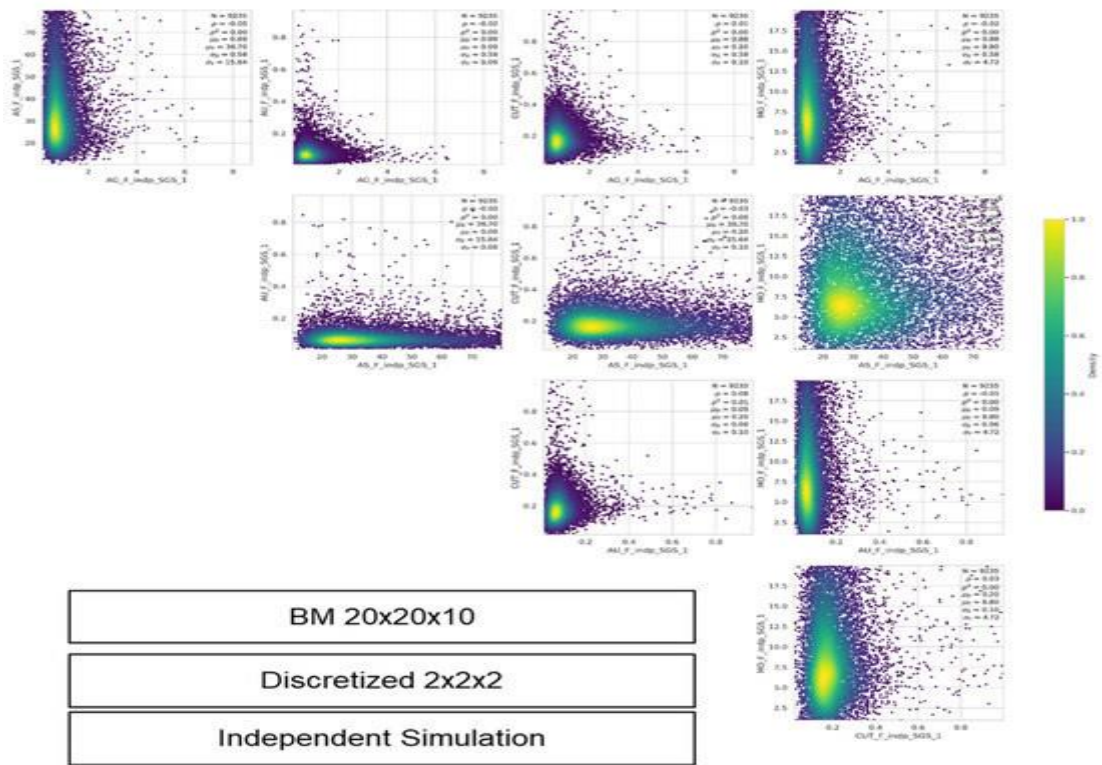


Рис. 11 Матрица двумерных точечных диаграмм рассеяния — независимые точки - с помощью SGS.

Чтобы понять, как это влияет на извлекаемые ресурсы, было создано несколько моделей для золота с учетом различных граничных условий (жестких границ или использования мягких границ, когда в руде наблюдался переход от одного типа к другому) и различных способов обработки выбросов (с ограничением или без ограничения по высокому содержанию металла). Граничные условия не оказали существенного влияния на результаты, в то время как использование ограничений по верхнему пределу содержания металла и по высокому содержанию металла показало, что влияние на общее содержание металла варьируется в зависимости от области и может отличаться на 25%, что свидетельствует о чувствительности модели к обработке экстремальных значений.

### 3.6. Геометрическая классификация и рекомендации по бурению.

Была проведена геометрическая классификация на основе анализа расстояния между скважинами (DHS), в результате которой блоки были разделены на четыре категории:

- A: 0–50 м
- B: 50–100 м
- C: 100–150 м
- D: >150 м

Наиболее информированных зон (A) было немного, особенно в категориях MQ и PG. Наилучшее распределение было в категории MV: 14% в категории A. Следует отметить, что целью этого исследования было не определение классификации для раскрытия информации о минеральных ресурсах, а скорее предоставление одного из источников информации для рекомендаций по бурению новых скважин.

Рейтинг перспективности был составлен на основе предыдущей классификации, в которой учитывались данные DHS с приоритетом для районов с высоким уровнем риска или неопределённости, а также для районов с низкой плотностью информации (рис. 12).

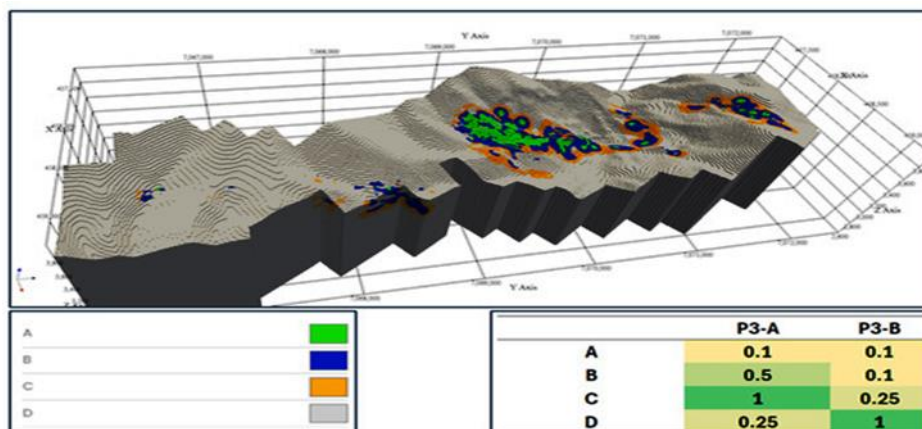


Рис. 12 Классификация и присвоение весовых коэффициентов на основе приоритетности областей с высоким уровнем опасности/неопределенности (P3A) или областей с низким уровнем информации (P3B).

Этот показатель был объединён с другим показателем, основанным на классах, определённых для процентилей соответствующего класса E и условной дисперсии класса по результатам SGS (рис. 13).

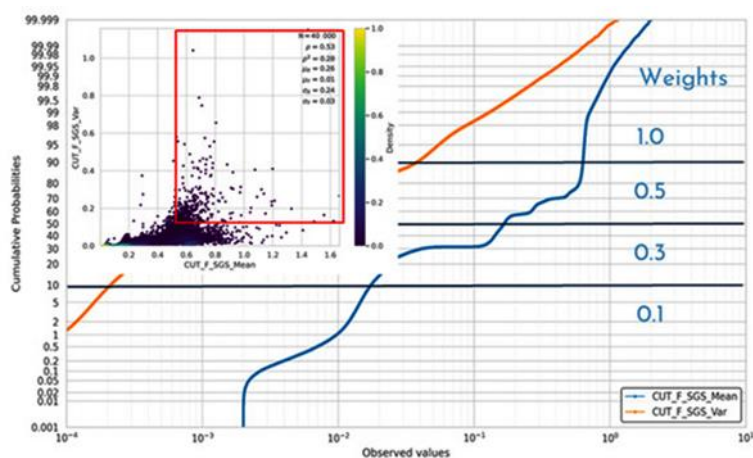


Рис. 13 Весовые коэффициенты, рассчитанные на основе SGS E-типа и условной дисперсии.

Затем взвешенные баллы по каждому блоку были суммированы по вертикали для получения показателя перспективности (рис. 14).

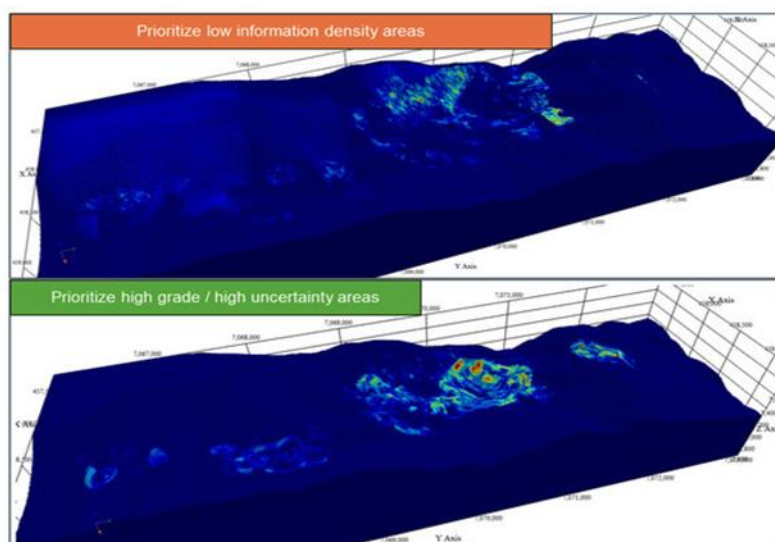


Рисунок 14. Карты перспективности для двух сценариев.

На основе этих карт были рекомендованы места для бурения.

### 3.7. Результаты и рекомендации.

Пример Сан-Антонио - Потрерильос продемонстрировал как сложности, так и потенциал современного геостатистического моделирования в системах, связанных с добычей нескольких видов полезных ископаемых. Он показал, что быстрые итеративные циклы моделирования и анализ неопределенности могут быть очень полезны для выявления пробелов в информации и понимании, а также для выявления слабых мест модели.

Во-первых, качество любой модели минеральных ресурсов зависит от наличия согласованной геологической модели. Это означает, что для создания надежной модели необходимы доменное управление, целостность данных и тщательная калибровка статистических допущений. Использование *Annapurna<sup>TM</sup> Resource* не только позволило быстро создавать технически надежные модели, но и упростило рабочий процесс, в рамках которого геологические гипотезы можно было проверять, уточнять и внедрять в течение нескольких часов, превратив моделирование из статичного процесса составления отчетов в динамичный инструмент принятия решений (табл. 8).

Табл. 8.

**Время вычислений для основных моделей в *Annapurna<sup>TM</sup> Resource*.**

| Block Size (m <sup>3</sup> ) | Method   | Sectors | Processing Time (h:min:s) |             |
|------------------------------|----------|---------|---------------------------|-------------|
|                              |          |         | 1 Variable                | 5 Variables |
| 20 × 20 × 10                 | IDW      | All     | 00:14:51                  | 01:14:15    |
|                              | OK       | All     | 00:13:44                  | 01:08:40    |
|                              | NN       | All     | 00:10:26                  | 00:52:10    |
|                              | SGS      | All     | 01:49:53                  | 09:09:25    |
|                              | SGS PPMT | PN      |                           | 00:34:38    |
| 10 × 10 × 10                 | SGS      | All     | 02:40:30                  | 13:22:30    |

Основные результаты и рекомендации, полученные в ходе этого быстрого итеративного анализа, заключаются в следующем:

#### ***Геологическая модель:***

*Регистрация и моделирование:* анализ согласованности между геологическими данными и интерпретированными геологическими объектами в геологической модели — полезный инструмент для выявления областей, в которых геологическую модель можно усовершенствовать, или, наоборот, областей, в которых данные необходимо пересмотреть, чтобы обеспечить их согласованность во всех разведочных районах. Выявление несоответствий между данными и моделью позволяет оперативно внести изменения в модель и гипотезы.

*Интерпретация:* сравнение геологической модели с моделью, полученной с помощью индикаторного кригинга, позволяет определить возможные колебания среднего содержания, тоннажа и металла при текущем объеме бурения. Это упражнение может помочь обосновать необходимость дополнительного бурения в определенных районах, чтобы снизить неопределенность, связанную с геологической моделью. Использование этой информации в сочетании со знаниями о геологическом строении района может стать мощным инструментом для определения перспективных участков в соответствии с приоритетами компании (снижение объемного риска, повышение качества классификации, поиск месторождений с высоким содержанием полезных ископаемых или уточнение геологической интерпретации).

*Доминирующая область:* анализ статистического и пространственного распределения различных сортов в разных секторах дает необходимую информацию для подтверждения существующих доменов или выявления новых контрольных точек, которые, возможно, не были учтены при текущей геологической интерпретации. Учитывая, что проект находится на стадии ГРР, эта информация поможет постоянно совершенствовать модель и перейти к последующим этапам реализации проекта, чтобы оценить коммерческий потенциал этих объектов.

### ***Ресурсная модель.***

*Чувствительность к геологической модели:* при сравнении текущей модели с моделью, полученной с помощью индикаторного кригинга, анализ показывает диапазон ожидаемых колебаний содержания, тоннажа и металла выше границы, что отражает неопределенность на текущем этапе ГРР. Эта информация важна для принятия решения о том, какие аспекты модели можно пересмотреть и где проведение новых буровых работ позволит максимально снизить эту неопределенность.

*Метод оценки:* использование различных методов оценки не привело к существенному изменению объема доступных ресурсов, а значит, на данном этапе проекта это не должно вызывать беспокойства.

*Чувствительность параметров оценки:* чувствительность к границам доменов и объединению данных для расчета вариограммы не привела к существенным различиям, в отличие от обработки выбросов, которая повлияла на результаты оценки извлекаемых ресурсов в некоторых доменах. Это говорит о необходимости тщательной обработки выбросов при оценке минеральных ресурсов.

*Многомерное моделирование:* использование передовых методов, таких как РРМТ, для воспроизведения взаимосвязей между различными элементами в разных областях и секторах позволяет создавать модели, которые можно дорабатывать с учетом показателей эффективности, объединяющих все атрибуты (например, NSR). Учитывая существующие корреляции, рекомендуется учитывать эти взаимосвязи при прогнозировании экономических результатов.

### ***Постобработка.***

*Создание сценариев:* гибкое построение нескольких сценариев с использованием передовых методов геологического и ресурсного моделирования помогает принимать решения о выборе наиболее перспективных геологоразведочных проектов в рамках стратегической бизнес-модели. Анализ позволил определить стратегию, в рамках которой приоритетными для дальнейшего изучения будут те участки, где текущая информация позволяет строить модели с достаточной степенью достоверности, учитывая стадию ГРР.

*Рекомендации по расположению скважин:* совместное использование данных о расстоянии между скважинами и количественной оценки неопределённости с помощью геостатистического моделирования позволило определить индекс перспективности на основе многоцелевой функции. Это позволяет определить наиболее подходящие места для бурения, направленного на обнаружение крупных залежей в зонах с высокой степенью неопределённости, или для расширения ресурсов в районах с низкой информативностью.

#### **4. Выводы.**

1. Наличие проработанных методологий и технологий позволяет быстро и гибко создавать геологические модели и модели ресурсов. Возможности Agile-моделирования помогают принимать решения о наилучшем пути реализации горнодобывающего проекта как на ранних стадиях, так и в процессе разработки и эксплуатации, предоставляя актуальную информацию о ходе моделирования. Это позволяет реагировать на изменения, пересматривая и корректируя модель, либо подтверждая использованные гипотезы и переходя к следующему этапу, не тратя время на ожидание и повторную проработку многих этапов после получения обратной связи.

2. Приведен пример из практики крупного рудного района, где информация различается как по качеству, так и по количеству. Цель — оценить потенциал для дальнейшего развития с учетом геологической интерпретации, определения области применения и оценки ресурсов. Для этого были сгенерированы модели с различными допущениями, протестированы разные интерпретации, параметры и подходы к моделированию. Основные результаты показывают, что можно уточнить определение областей применения и что при оценке ресурсов следует уделять особое внимание работе с «выбросами». Кроме того, необходимо более тщательно изучить области с высокой степенью неопределенности, выявленные при сравнении текущей геологической интерпретации с моделью индикаторного кригинга, чтобы понять причины этих расхождений. Наконец, использование многомерного моделирования с помощью метода РРМТ для выявления взаимосвязей между различными категориями запасов свидетельствует о необходимости сохранения этих взаимосвязей при построении экономической модели с использованием метода NSR. Каждое из этих открытий было использовано для определения приоритетных направлений работы по сбору новых данных, уточнению интерпретаций и подтверждению предположений.

3. Передовые платформы, такие как *Annapurna™ Resource*, позволяют легко внедрять модели, использующие широкий спектр базовых и продвинутых геостатистических методов. Это подчеркивает ценность быстрого создания моделей для анализа сценариев и планирования на ранних этапах ГРП. Результаты основаны на автоматизированных рабочих процессах,

соответствующих лучшим отраслевым практикам, но без детальной калибровки параметров. Таким образом, модели полезны для определения ключевых параметров и допущений, но не подходят для составления нормативных или инвестиционных отчетов. Эти модели и рабочие процессы можно легко воспроизвести на других платформах, предлагающих аналогичные методологии, для получения схожих результатов. Одним из ключевых аспектов рабочих процессов на платформе, использованной в этом исследовании, является возможность обеспечить полную прозрачность используемых параметров, что позволяет проводить аудит воспроизводимости.

4. Автоматизация вывода параметров и использование облачных вычислительных платформ могут вызвать опасения у специалистов и инвесторов. Демонстрация преимуществ этих оптимизированных платформ для быстрого создания сценариев может помочь укрепить доверие к их результатам. Важно понимать, что «автоматизированный» не означает «непрозрачный». Эти методы позволяют вести прозрачный учет всех параметров, используемых при построении модели, а значения выводятся автоматически, что ускоряет процесс. Таким образом, акцент смещается с того, что эксперты тратят время на создание моделей с использованием хорошо зарекомендовавших себя методов, на улучшение понимания м-ния за счет анализа результатов моделирования и проверки их соответствия имеющимся геологическим данным. Опасения по поводу безопасности и надежности современных облачных технологий не должны стать серьезным препятствием, поскольку эти системы оснащены надежным шифрованием, средствами контроля доступа и непрерывного мониторинга, а также подчиняются договорным протоколам защиты данных.

5. Интеграция других передовых методов в эти платформы снизит барьеры для их внедрения и использования. Благодаря встраиванию сложных методов в оптимизированные рабочие процессы акцент смещается с технической сложности применения специализированных инструментов на стратегическое использование их результатов. Следующим логичным шагом станет разработка «живых ресурсных моделей» в режиме, близком к реальному времени, что станет возможным благодаря интеграции производственных данных, информации о бурении и непрерывных потоков данных с датчиков, собираемых в ходе ГРП. Такая интеграция позволит динамически обновлять модели, формируя меняющуюся картину м-ния, отражающую как геологическую неопределенность, так и эффективность работы. Согласно этому подходу, ресурсные модели превращаются из статичных инструментов поддержки принятия решений в адаптивные системы, которые помогают планировать, оптимизировать производство и повышать прозрачность на протяжении всего жизненного цикла горнодобывающего проекта.

## 5. Мировоззрение.

Гибкое создание геологических и ресурсных моделей для тестирования альтернативных вариантов и оценки влияния ключевых допущений при построении моделей позволяет принимать решения в горнодобывающих проектах практически в режиме реального времени. Это применимо ко всем этапам разведки и добычи полезных ископаемых. На ранних этапах, когда информации недостаточно, модели в значительной степени зависят от интерпретации данных и допущений (как в случае с двумя объектами разведки — PG и PN — в данном исследовании). В таких условиях ограниченные данные скорее помогут опровергнуть допущения, чем подтвердить их. На более поздних этапах, как в случае с Mina Vieja (MV), когда буровых работ достаточно для оценки запасов полезных ископаемых, предположения все чаще уступают место фактам, и задача состоит в том, чтобы поддерживать актуальность моделей и их соответствие большому объему собираемых эксплуатационных данных, в идеале — практически в режиме реального времени.

В любом случае автоматизированные рабочие процессы упрощают сравнение и обновление моделей по мере поступления новых данных. Снижение порога вхождения в использование передовых инструментов также улучшает управление проектами. Например, количественная оценка неопределенности и информирование специалистов по планированию горных работ о рисках способствуют более взвешенному подходу к рискам при составлении графиков и планов на разные периоды.

Будущее выглядит многообещающе. Было разработано множество новых методов, которые могут дополнить уже существующие инструменты. К ним относятся учет ошибок выборки для оценки дополнительного риска, связанного с необъективными или некачественными выборками, построение меньшего количества, но более информативных сценариев с помощью моделирования антитетической случайной функции, работа с нелинейными переменными в геометаллургическом моделировании, методы кластеризации с учетом пространственных данных, адаптированные к местным условиям, многомерные модели с локально изменяющимися корреляциями и подходы к планированию, явно учитывающие неопределенность.

### III. ДДЗ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ХРОМИТСОДЕРЖАЩИХ ЗОН В ОФИОЛИТАХ (труднодоступные горные массивы Северного Омана) [6].

#### 1. Введение.

Семаильский офиолит Омана –наиболее полный пример хорошо обнаженных пород океанского дна. Он состоит из двух основных литологических подразделений: частично серпентинизированных мантийных ультраосновных пород, включающих гарцбургит с дунитом (перидотиты) и габбро-базальтовые породы вышележащего разреза земной коры (рис. 1а).

В кровле офиолитовой толщи ниже пелагических пород залегают рои диабазовых даек (слоистые дайки) и основные экструзивы – в основном спилиты с подушечными лавами или конгломератами (рис. 1б).

В ультраосновных породах, слагающих Семаильские массивы, широко распространено хромитовое оруденение. Массивные образцы хромитов этого района имеют содержание  $Cr_2O_3$  от 31,5 до 54,61 мас% при соотношении Cr:Fe от 1,84:1 до 2,96:1. Благодаря большой площади (1169 км<sup>2</sup>) и чрезвычайной труднопроходимости, при высоте от 0 до 2500 м, исчерпывающий пробоотбор и детальное картографирование невозможны (рис. 1в).

Данные спутникового дистанционного зондирования (ДДЗ) способны обеспечить более детальное картирование площадей хромитовых минерализованных зон в ультраосновной части офиолита. ДДЗ является наиболее подходящим методом для применения в засушливых регионах, таких как Оман, где на поверхности имеются обнажения горных пород и нет растительности (рис. 1д).

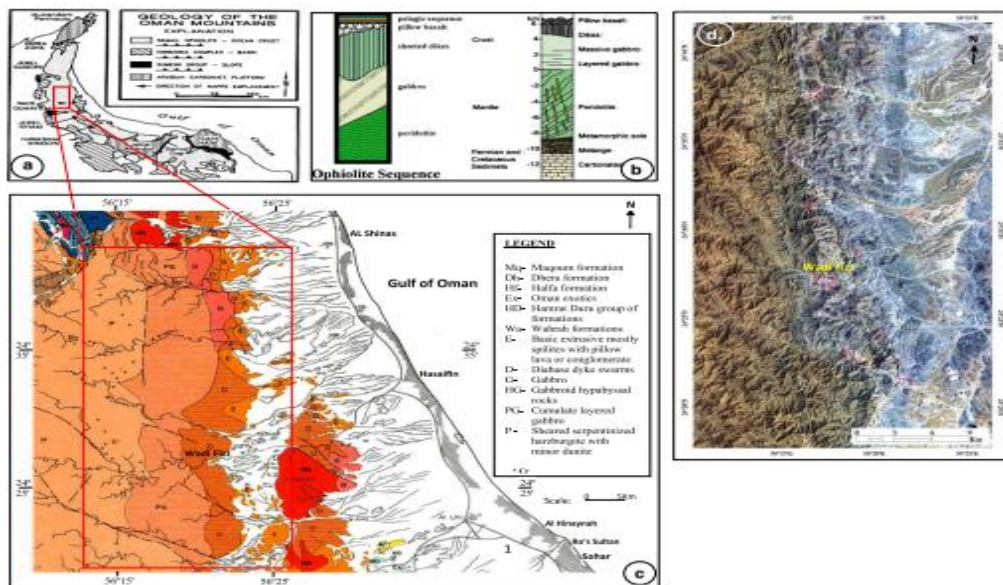


Рис. 1. **а.** Схема региона Оман с указанием м-ния; **б.** Офиолитовая последовательность; **с.** Геологическая карта; **д.** Изображение исследуемой территории ASTER RGB.

Полосы ASTER и их более длинноволновые области позволяют различать широкий диапазон минеральных составов и литологий. Изображения ASTER и Landsat TM в ближней инфракрасной области (VNIR) и коротковолновой инфракрасной области (SWIR) были использованы для изучения литологии и картирования офиолитов. Были применены методы декоррелированного растяжения, различного нормирования полос и анализа главных компонентов (РСА) для оконтуривания площади потенциальных хромитсодержащих минерализованных зон, залегающих в офиолитовых породах Семаильского массива в горном регионе Омана. Методы обработки изображений помогли выборочно выделить породы гарцбургита с дунитом и области потенциальных хромитовых минерализованных зон.

Нижеохарактеризованные методы можно рекомендовать при ГРП на хромитовое оруденение в офиолитах при создании прогнозно-литологических карт масштабов 1:100 000 и 1:50 000.

## **2. Геология района.**

Многочисленные исследования, подробно описывающие магматические и структурные характеристики офиолита Семаила, а также стратиграфию континентальной окраины Омана, прояснили эволюцию и пассивный характер этой окраины в период от перми до позднего мела. Геометрия и характер континентальной окраины, ограничивающей Аравийскую карбонатную платформу в районе Оманских гор, были нарушены в ходе позднемеловой Оманской складчатости. Обширные надвиговые покровы Семаильского офиолитового комплекса покрывают большую часть окраины Аравийской карбонатной платформы. Офиолит Семаил представляет собой плиту меловой океанической коры и мантии длиной 600 и шириной 150 км, образовавшуюся в результате закрытия Тетийского океана. Это закрытие может быть связано с более ранним фундаментальным изменением движения плит между Африкой и Евразией. Движение Африканской плиты изменилось с восточного направления на северное и к кампану развернулось почти на 63° — против часовой стрелки относительно Евразии. На восточной пассивной окраине Омана в раннем мелу произошло утолщение земной коры, когда фрагмент Гондваны переместился на север, вызвав трансгрессию и, возможно, столкнувшись с этой окраиной. Дивергенция океанической коры Тетиса в центре спрединга к северо-востоку от окраины Омана инициировала обдукцию офиолита Семаил гравитационным скольжением по погружающейся пассивной окраине континента. Более позднее поднятие гор Омана в третичном и четвертичном периоде было связано с продолжающимся столкновением между Аравия и Евразия.

Район исследования (рис. 1в) к западу от региона Аль-Шинас-Хасайфин-Сохар расположен в Семаильских офиолитовых массивах. Породы состоят из сильно рассланцованных гарцбургитов с дунитами (P), кумулятивных слоистых габбро (PG), габброидных гипабиссальных пород (HG), габбро (G), роев диабазовых даек (D) и основных экструзивов, которые в основном представляют собой спилиты с подушечными лавами или конгломератами. Офиолитовые метагаббро в этом районе тесно связаны с другими офиолитовыми представителями, то есть с гарцбургитами и метабазальтами. Мафит-ультрамафитовая переходная зона в Семаильском офиолите расположена между кровлей сильно рассланцованного гарцбургитового (с дунитом) тектонического подразделения и основанием сплошного слоистого габбро.

Двумя наиболее важными особенностями переходной зоны являются: (1) дуниты врастают в гарцбургиты, следуя рисунку вен, который более или менее транспонирован в лентичулярный переход. Вверху они образуют сплошное целое, внизу слоистые габбро; (2) «стручки» хромита, либо несогласные, либо конкордантные наслоению, унаследованному от астеносферного потока, расположенного в пределах переходной зоны.

### 3. ДДЗ.

Чтобы лучше различать гарцбургиты и области хромитов несущие минерализованные зоны внутри переходной зоны, сравнительное исследование было проведено между спектральными диапазонами Landsat TM и ASTER.

Landsat TM, записывает данные семи мультиспектральных диапазонов, включая шесть каналов в видимой и отраженной инфракрасная части электромагнитного спектра и один канал в тепловом инфракрасном диапазоне. Данные Landsat TM, использованные в этом исследовании, были получены 4 марта 2003 г. при 0% облачности.

Датчик ASTER на борту платформы системы наблюдения Земли (EOS) TERRA представляет собой мультиспектральную систему формирования изображений, запущенную в декабре 1999 года и перемещающуюся по почти круговой солнечно-синхронной орбите с наклоном примерно  $98,2^\circ$ , высотой 705 км и повторный цикл 16 дней. В этом материале используются 14-канальные данные ASTER Level 1B, полученные 18 апреля 2006 г. Изображения предоставляются в виде масштабированных данных об излучении на датчике с примененными радиометрическими и геометрическими поправками. Он имеет географическую привязку в проекции UTM и для эллипсоида WGS-84.

Характеристики датчиков и диапазоны длин волн обоих приборов приведены в таблице 1.

### Характеристики датчиков Landsat TM и ASTER

| Sensors                                     | Landsat TM         | ASTER                                      |  |  |
|---|--------------------|--|--|--|
| Characteristics                             |                    | VNIR                                       | SWIR   | TIR  |
| Spectral bands with range ( $\mu\text{m}$ ) | Band 1 0.45–0.52   | Band 01 0.52–0.60<br>Nadir looking         | Band 04 1.6–1.7                              | Band 10 8.125–8.475                          |
|   | Band 2 0.52–0.60   | Band 02 0.63–0.69<br>Nadir looking         | Band 05 2.145–2.185                          | Band 11 8.475–8.825                          |
|   | Band 3 0.63–0.69   | Band 03N 0.76–0.86<br>Nadir looking        | Band 06 2.185–2.225                          | Band 12 8.925–9.275                          |
|   | Band 4 0.76–0.90   | Band 03B 0.76–0.86<br>Backward looking     | Band 07 2.235–2.285                          | Band 13 10.25–10.95                          |
|   | Band 5 1.55–1.75   |  | Band 08 2.295–2.365                          | Band 14 10.95–11.65                          |
|   | Band 6 10.40–12.50 |  | Band 09 2.36–2.43                            |  |
|   | Band 7 2.08–2.35   |  |  |  |
| Spatial Resolution (m)                      | 30                 | 15   | 30   | 90   |
| Swath width (km)                            | 180                | 60   | 60   | 60   |
| Radiometric Resolution (bits)               | 8                  | 8  | 8  | 12   |
| Cross track Pointing                        |                    | $\pm 318 \text{ km } (\pm 24 \text{ deg})$ | $\pm 116 \text{ km } (\pm 8.55 \text{ deg})$ | $\pm 116 \text{ km } (\pm 8.55 \text{ deg})$ |

Увеличение спектральных полос в диапазоне ASTER SWIR (одна спектральная полоса для Landsat против шести спектральных полос для ASTER) расширяет возможности поверхностного литологического картирования.

#### 4. Спектральные характеристики офиолитов и хромитов.

Помимо синоптического охвата, обеспечиваемого ДДЗ, еще одним важным преимуществом этого метода является использование свойств отражательной способности за пределами видимого диапазона спектра для распознавания типов горных пород. Спектр отражения горной породы зависит от минералогического состава ее поверхности, который обычно представляет собой смесь всей минералогии породы и минералов выветривания. Поглощение в диапазонах видимого и коротковолнового инфракрасного диапазона может возрастать из-за электронных или колебательных процессов, происходящих в этих минералах. Исследования спектрального отражения дают важное представление о причинах спектральных изменений для интерпретации данных оптического дистанционного зондирования литологии офиолитов. Лабораторные спектры отражения указывают на диапазон спектральных особенностей, создаваемых некоторыми минералами офиолита, которые могут доминировать на выветрелых поверхностях (рис. 2).

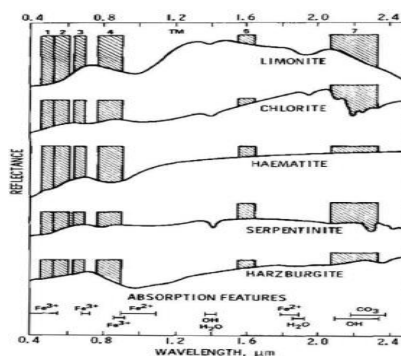


Рис. 2. Лабораторные измерения спектров минералов и горных пород офиолитов с помощью Landsat TM.

Спектры, собранные из двух невыветрелых литологий офиолитов, как примеры идеализированного спектрального отклика, который в действительности частично или полностью маскируется откликом выветрелых минералов. Серпентинит демонстрирует относительно плоский спектральный отклик. Мелкая особенность на 0,45 мкм обусловлена трехвалентным железом, а более широкое поглощение сосредоточено около 0,9 мкм или около 1,0 мкм происходит за счет двухвалентного железа. Достаточно резкая полоса при 2,3 мкм обусловлена колебательными процессами Mg–ОН и эффектами гидратации, что проявляется в поглощении вблизи 1,4 мкм. Спектр гарцбургита имеет широкую особенность, связанную с двухвалентным железом в минералах пироксена и оливина, с центром около 1,0 мкм.

В целом электронные процессы в минералах включают три типа: зоны проводимости, перенос заряда и эффекты кристаллического поля.

Присутствие двухвалентного железа на выветрелой поверхности приводит к поглощению с центром около 0,45 мкм, 1,0–1,1 мкм, 1,8–1,9 мкм и 2,2–2,3 мкм, в зависимости от его кристаллического окружения. Трехвалентное железо вызывает поглощение при длинах волн около 0,65 мкм и 0,87 мкм. Колебательные процессы, вызывающие видимое и коротковолновое инфракрасное поглощение, — это изгибные и растягивающие колебания связей внутри радикалов или молекул. На поверхности магматических пород наибольшее значение имеют Al–ОН и Mg–ОН в глинах, слюдах и амфиболах. Al–ОН производит поглощение с центром примерно 2,2 мкм, тогда как Mg–ОН дает особенности около 2,3 мкм. Содержание Cr имеет глубину полосы поглощения около 0,55 мкм. Наилучшие корреляции существуют между содержанием Cr и положениями длин волн при 0,49, 0,59, 2, 17,5 и 23 мкм в полосах поглощения. В этом исследовании присутствие ионов железа в основных и ультраосновных породах, вероятно, ответственно за все обнаруживаемые полосы. Сильно расслоенный и выветрелый гарцбургит (с большим количеством серпентина) офиолита Семаил можно отличить по простому цветовому составу: 0,45 мкм (зеленый), 0,9 или 1,0 мкм (красный) и 2,3 мкм (синий), который может представлять собой гарцбургит зеленого цвета и дунит желтого цвета, а выделение гарцбургита, содержащего хромиты, может указывать на очень резкий контакт с другими литологическими составами.

## **5. Методология.**

При картировании площади потенциальной хромитовой минерализованной зоны и вмещающего гарцбургита исследуемой территории использованы методы обработки изображений декоррелированного растяжения, различного нормирования полос и анализа главных компонент. На заключительных этапах проведена полевая заверка.

Метод декорреляционного растяжения основан на преобразовании главных компонент полученных данных. Преобразованные каналы могут быть растянуты по контрасту и им произвольно назначены основные цвета составного изображения. Декорреляционное растяжение офиолита Омана дают изображения (RGB: 7, 5 и 4), способные распознавать изменения в составе габбро и идентифицировать небольшие кислые, габброидные и ультраосновные интрузии. Метод способен различать гарцбургит и хромитсодержащие минерализованные зоны по данным Landsat TM.

Изображения соотношения полос используются для подавления топографических изменений и разницы в яркости изображения, связанной с изменением размера. Этот метод успешно использовался при литологическом картировании Аравийского Нубийского щита. Выбор полос для изображений с разным соотношением основан на спектральных характеристиках горных пород. При применении методов нормирования все разумные группировки минералов таких пород лучше всего различаются комбинацией соотношений, включающей коротковолновые полосы (т.е. 3/1, 4/1 или 4/2), а также соотношение длинноволновых полос (5/7) и соотношение по одной полосе из групп коротковолновых и длинноволновых полос (например, 5/4 или 5/3).

Такие изображения отношений, предназначенные для отображения спектрального контраста конкретных особенностей поглощения, широко используются в ДДЗ. Для распознавания гарцбургитовых (содержащих больше серпентина) пород и хромитсодержащих минерализованных зон исследуемой территории с использованием спутниковых данных Landsat TM соотношения полос RGB, использованные для дискриминации серпентинитов (5/7, 5/1, 5/4×4/3), (3/5, 3/1, 5/7) и ((5/3, 5/1, 7/5) и (7/5, 5/4, 3/1)). Эти соотношения полос можно использовать для различения серпентинитов офиолитов, содержащих большое количество магнетита и гидроксилсодержащих минералов, от окружающих основных пород в засушливых регионах.

Учитывая спектральную информацию в частях длин волн VNIR и SWIR, данные ASTER представляют собой огромную инновацию с точки зрения улучшенных спектральных характеристик и более высокого пространственного разрешения. Минералы и горные породы, имеющие диагностические спектральные характеристики в этом диапазоне длин волн, включают, среди прочего, оксиды железа, слоистые силикаты (глинистые минералы), сульфаты и карбонаты. Комбинации полос и полос ASTER эффективны для подчеркивания спектральных характеристик определенных пород и минералов и распознавания гарцбургита офиолитов. Для лучшего картирования гарцбургита и очерчивания области хромитовой потенциально минерализованной зоны в офиолитах исследуемого региона использовали потенциал областей

VNIR и SWIR данных ASTER, а также методы нормирования полос ASTER и методы обработки изображений анализа главных компонент (PCA), которые также обычно применяется к данным Landsat Thematic Mapper (TM) для определения зон гидротермальных изменений, связанных с рудными м-ниями. Изображения соотношения полос ASTER (4/7, 4/1, 2/3×4/3) и (4/7, 3/4, 2/1) использовались для картирования офиолитов, метаосадков, вулканокластики и гранитоидов литологических единиц неопротерозойской сутуры Аллаки на юге Восточной пустыни Египта. Были использованы соотношения полос ASTER ((2+4)/3, (5+7)/6, (7+9)/8) путем суммирования, представляющих плечи абсорбционных особенностей, в качестве числителя: и полоса, расположенная ближе всего к элементу поглощения, в качестве знаменателя для различения различных офиолитовых и гранитных пород в цветовой комбинации красного, зеленого и синего (RGB) и идентификации офиолитовых пород, метагаббро и метабазальтов.

В методе PCA взаимосвязь между спектральными откликами целевых минералов или пород и извлеченными числовыми значениями из матрицы собственных векторов используется для расчета изображений главных компонент. Используя это соотношение, можно определить, какие ПК содержат спектральную информацию, связанную с минералами, и имели ли цифровые номера (DN) пикселей, содержащих целевые минералы, высокие (яркие) или низкие (темные) значения. PCA применяется к 9 диапазонам ASTER исследуемой территории. Принято считать, что первые три главных компонента высокого порядка (1, 2 и 3) содержат более 99% спектральной информации; следовательно, они широко использовались для литологического картирования, а не последующие главные компоненты низкого порядка (4,5, 6 и т. д.), которые обычно содержат менее 1% спектральной информации и имеют низкое отношение сигнал/шум. Однако некоторые из главных компонент более высокого порядка предоставляют тонкую информацию о присутствии типов минералов и горных пород, которые пространственно доминируют на изображении. Также интересно использовать комбинацию определенных компонентов более низкого порядка, которая поглощает часть информации с основными компонентами более высокого порядка, чтобы выделить некоторые целевые спектральные характеристики.

## **6. Результаты и обсуждение.**

### ***6.1. Картирование офиолитов и хромитовых минерализованных зон.***

ДДЗ Landsat TM и ASTER исследуемой территории были обработаны с использованием обсуждаемых методологий. Декоррелированное изображение, обработанное с использованием

трех инфракрасных диапазонов (диапазоны ТМ 7, 5 и 4) отображаются красным, зеленым и синим (рис. 3).

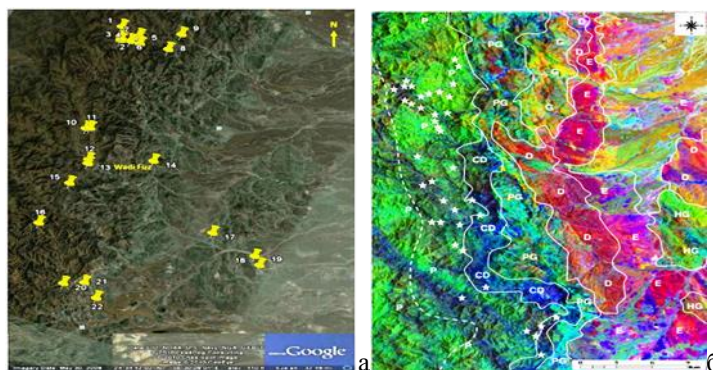


Рис. 3. Карта Google Earth исследуемой территории и проявления хромитов (а) и декоррелированное изображение территории Landsat TM RGB (7, 5, 4 канала) (б).

(E - основные экструзивы, сплиты с подушечными лавами или конгломератами; D - рои диабазовых даек; Г - габбро; HG - гипабиссальные габброиды; ПГ - кумулятивно-слоистое габбро; P и CD - расслоенный серпентинизированный гарцбургит).

Полосы 4 содержат информацию о наличии железа; полоса 5 характеризует общее альbedo, выделяя определенные измененные (содержащие трехвалентное железо) породы, которые имеют особенно высокие коэффициенты отражения вблизи 1,6 мкм, тогда как двухвалентное железо может вызывать депрессию кривой отражения в этой области, а полоса 7 реагирует на присутствие гидроксилсодержащих минералов за счет снижения отражательной способности из-за различных свойств, связанных с гидроксильными группами и H и O.

На декоррелированном изображении показаны почти все типы офиолитовых пород, которые различаются и разделяются по четким цветам и сравнимы с геологической картой (рис. 1с): (1) мантийная толща - серпентинизированный гарцбургит с дунитом проявляется в двух отдельных цветовых единицах, включая верхнюю часть примерно на 1 км ниже Мохо, которая обычно представляет собой фиолетовый цвет на изображении (CD), не нанесенный на геологическую карту, а большая часть остальной мантийной толщи имеет темно-зелено-желтый цвет (P); (2) гарцбургит с интрузиями габбро (PG) имеет цвет от голубого до зеленовато-желтого за счет отражения различия в основном составе; (3) наиболее распространены габбро высокого уровня (G) часто желтого цвета; (4) диабаз (D) часто проявляется в виде розовых участков, но имеет различные цвета из-за различной степени покрытия оксидом и гидроксидом железа и различий в первичной минералогии и (5) основные экструзии (E) обычно имеют цвет от оранжевого до красного, а лавы имеют преимущественно пурпурный цвет. Области, которые особенно затронуты хлорит-эпидотическими изменениями (особенно внутри слоистых даек и верхних частей габбро), имеют тенденцию выглядеть оранжевыми из-за сильного поглощения трехвалентного железа в полосе 4, что приводит к некоторой неопределенности в литологической интерпретации.

Темноцветное поглощение области (CD) на границе между темно-зелено-желтый цвет с сильно срезанными серпентинизированными гарцбургит (тектонизированный) (P) и желтый цвет, показывающий габбро (PG) связано с присутствием оксидов железа (или переменных процентных содержаний в основных элементах). Интерпретируем область потенциальной хромитовой минерализации зоны внутри мантийных толщ (область фиолетового цвета: верхняя часть (CD) и темно-зелено-желтого цвета: нижняя часть (П), внизу Мохо (линия, разделяющая PG) длиной от 1 до 5 км (до пунктирной линия) на основе интерпретации изображений и полученных данных о проявлениях хромитов (отмечены звездочкой), имеющиеся на геологической карте (рис. 1с) и выявленные хромитовые рудники на карте «Google Earth». Расположение проявлений хромитов нанесены с пространственной точностью 4–5 пикселей на снимке Landsat TM, с точностью не менее 150 м. Изображения, полученные с помощью соотношения полос (5,7, 5/1, 5/4×4/3), (3/5, 3/1, 5/7), ((5/3, 5/1, 7/5) и (7/5, 5/4, 3/1)) исследуемой территории приведены на рисунке 4.

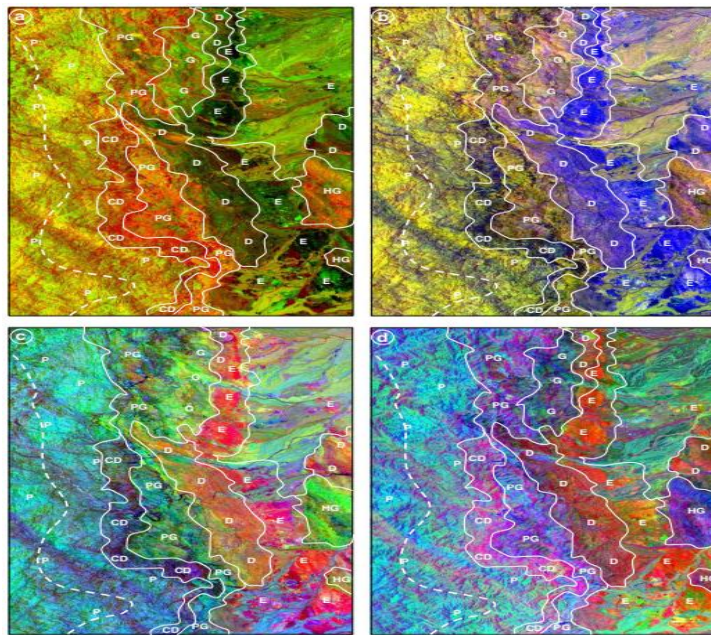


Рис. 4. Соотношения полос Landsat RGB (5/7, 5/1, 5/4×4/3), (3/5, 3/1, 5/7), (5/3, 5/1, 7/5) и (7/5, 5/4, 3/1) (E - основные экструзивы, сплиты с подушечными лавами или конгломератами; D - рои диабазовых даек; Г - габбро; HG - гипабиссальные габброиды; ПГ - кумулятивно-слоистое габбро; P и CD - расслоенный серпентинизированный гарцбургит).

Изображения соотношения полос RGB показывают, что серпентинизированный гарцбургит имеет темно-зелено-желтый цвет вследствие поглощения MgO- и OH-содержащие минералы. Площадь минерализованной зоны, ограниченная от Мохо ярко-красным цветом, обусловлена высокой степенью поглощения железосодержащих минералов. Зона имеет фиолетово-желтый цвет. Изображения соотношения полос RGB (5/3, 5/1, 7/5 и 7/5, 5/4, 3/1) показывают серпентинизированные гарцбургиты темно-фиолетово-голубоватого цвета, который зависит от на выбранных комбинаций диапазонов. На изображениях показана область

хромитовой минерализованной зоны темно-фиолетового цвета (3/5, 3/1, 5/7 и 5/3, 5/1, 7/5) и розового цвета (7/5, 5/4, 3/). 1) цвета. Эта зона легко интерпретируется из-за высокой яркости красного цвета.

По всем изображениям соотношения полос ASTER RGB, обработанным на основе вышеуказанных комбинаций, оказалось очень эффективным в выделении серпентинизированных гарцбургитов и оконтуривании области, минерализованных зон хромитов (рис. 5-7).

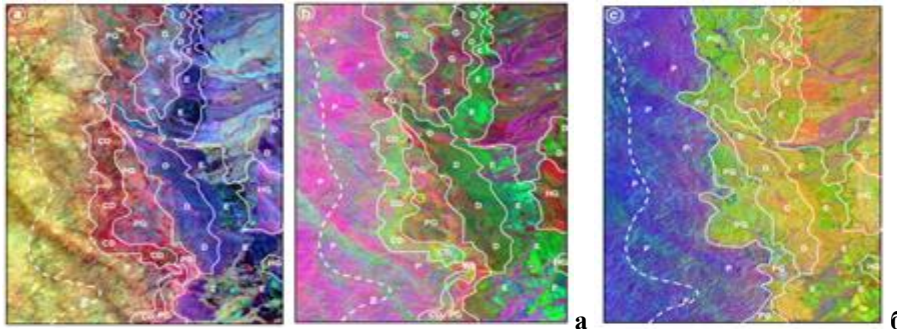


Рис. 5. Соотношения полос ASTER RGB: **а.** (4/7, 4/1, 2/3, 4/3) и (4/7, 3/4, 2/1); **б.** ((2+4)/3, (5+7)/6, (7+9)/8) (E - основные экструзивы, сплиты с подушечными лавами или конгломератами; D - рои диабазовых даек; Г - габбро; HG - гипабиссальные габброиды; ПГ - кумулятивно-слоистое габбро; P и CD - расслоенный серпентинизированный гарцбургит).

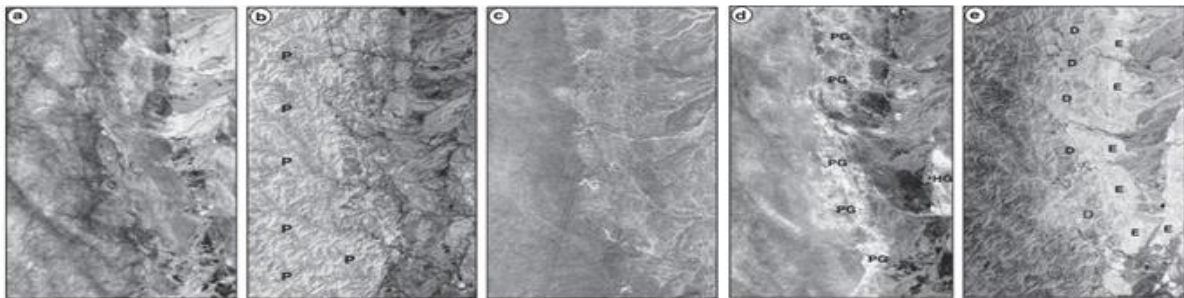


Рис. 6 PC1–PC5 диапазонов PCA исследуемой территории.

(E - основные экструзивы, сплиты с подушечными лавами или конгломератами; D - рои диабазовых даек; HG - гипабиссальные габброиды; ПГ — кумулятивно-слоистое габбро; P - расслоенный серпентинизированный гарцбургит).

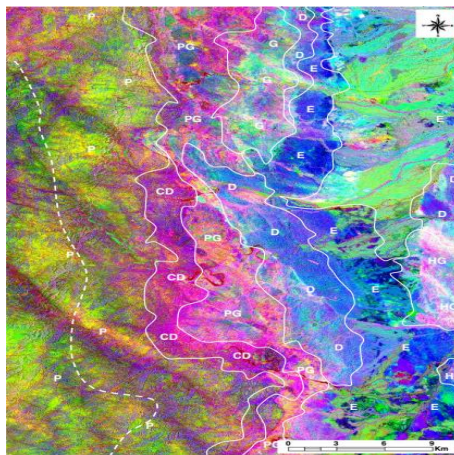


Рис. 7. RGB-изображения PC7, PC5 и PC4 полос PCA исследуемой территории.

(E - основные экструзивы, сплиты с подушечными лавами или конгломератами; D - рои диабазовых даек; Г - габбро; HG - гипабиссальные габброиды; ПГ - кумулятивно-слоистое габбро; P и CD - расслоенный серпентинизированный гарцбургит).

## 6.2. Полевая интерпретация.

Для оценки VNIR и SWIR спутников Landsat TM и ASTER по различению офиолитовых пород и хромитсодержащих минерализованных зон были проведены полевые исследования Семаильских офиолитовых массивов с использованием существующих геологических карт и интерпретированных спутниковых изображений (рис. 8).

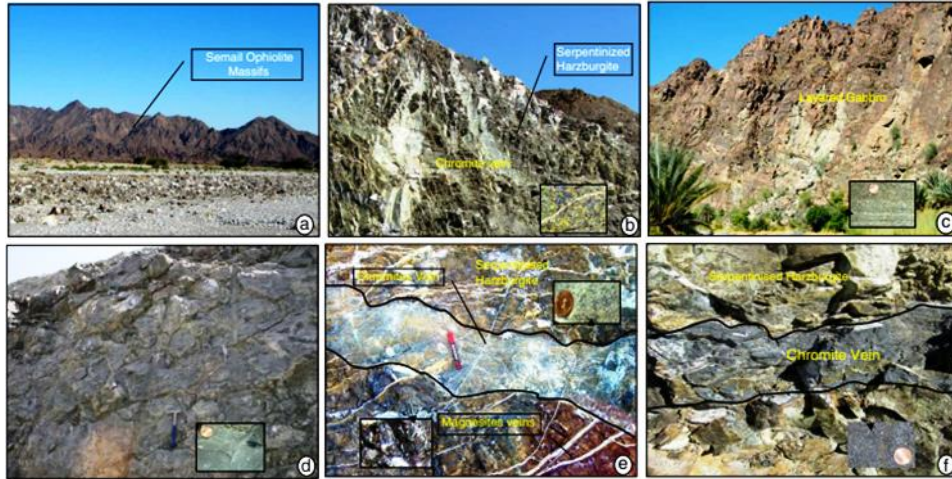


Рис. 8. Полевые фотографии:

(a) Семаильские офиолитовые массивы; (b) серпентинизированные гарцбургиты; (c) слоистые габбро и (d) метабазальты; проявления: (e) магнезита и (f) хромитовых жил в гарцбургите.

Практически во всех случаях полевые исследования подтвердили наличие реальной литологической информации и обнаружение площадей хромитсодержащих минерализованных зон по интерпретированным ДДЗ. На месторождении Семаильские офиолитовые массивы района исследований (рис. 8a) охватывают наиболее полную офиолитовую последовательность и представлены сильно рассланцованными серпентинизированными гарцбургитами (рис. 8b), слоистыми габбро (рис. 8c), дайками диабаза (рис. 9d). Офиолит практически не имеет почвенного и растительного покрова и образует пересеченный горный рельеф на высоте преимущественно от 500 до 1500 м (рис. 8a). Офиолит содержит полную офиолитовую последовательность из тектонизированных и в различной степени серпентинизированных гарцбургитов (мантийная толща), переходящих вверх в слоистые кумулятивные габбро и рой дайковых диабазов, а также подушечные лавы. Он прорван посттектоническими более поздними мафическими дайками, секущими почти все офиолитовые толщи Семаила. Мантийная часть состоит в основном состоит из рассланцованных, сильно тектонизированных и выветрелых гарцбургитов с небольшими количествами дунита, хромита и базального лерцолита. Дунит преобладает над гарцбургитом в самой верхней части, образующей переходную зону Мохо (CD на рис. 2, 4, 5 и 7). Больше серпентина наблюдается в серпентинитовых образованиях, а связанное с ним тело габбро относительно бедно серпентином. Гарцбургиты затронуты гидротермально-метасоматическими изменениями.

Выветрелые гарцбургиты прорезаны многочисленными магнезитовыми жилами (рис. 8в,d). Свежий гарцбургит мелко- и среднезернистый, массивный, зеленовато-серого цвета (рис. 8с). Окисленный гарцбургит приобретает цвет от красноватого до коричневатого при постепенном контакте со свежим серпентинитом (рис. 8d).

Также отмечается мелкозернистый и массивный магнезит, цементирующий отложения на больших площадях. Магнезит встречается в виде зерен от мелких до средних и обычно окрашен оксидами железа по границам зерен. Они образовались в результате выветривания серпентинита под действием поверхностных и грунтовых вод, богатых  $\text{CO}_2$ . Полевые исследования показывают, что хромитовые жилы встречаются в серпентинизированных гарцбургитах (рис. 8d, e). В образцах хромиты присутствуют в виде вкрапленных зерен или стручковидных тел. Метагаббро образуют удлиненное тело, которое демонстрирует слоистость в региональном масштабе (рис. 8в), где крупнозернистые метагаббро располагаются у подножия горы, а затем переходят вверх к среднезернистым породам на промежуточном уровне и мелкозернистым на вершине. Контакт метагаббро с серпентинитами сильно рассланцованный и милонитизированный. В разрезах офиолитов хорошей сохранности слоистость базальных слоистых габбро параллельна поверхности, отделяющей их от тектонизированных гарцбургитов.

Можно с уверенностью заявить, что цветовые различия, выявленные декорреляционным растяжением, разные нормирование полосы частот и PCA спутниковых данных хорошо коррелируют с литологией офиолитов и имеют прямое значение с точки зрения петрологии пород. Это позволяет уточнить границы существующих на картах толщ горных пород и выделить серпентинизированные гарцбургиты и более основные и менее основные габбро. На улучшенных изображениях изменение цвета от желтого через зеленый к голубому отражает увеличение основного содержания серпентинизированных гарцбургитов.

Выявлено множество габбровых и ультраосновных позднеинтрузивных тел параллельно минерализованной зоне в пределах офиолитовых массивов. В полевых условиях эта область представлена ритмично-слоистыми (кумулятивными) и многослойными (высокоуровненными) габбро. Офиолитовые metabазальты обнажены в виде удлиненного тела и надвинуты на серпентиниты. Залегание минерализованной зоны ниже на расстоянии 1–5 км, интерпретированное с помощью методов обработки изображений с пространственной точностью примерно менее 150 м по данным Landsat TM и 50 м по спутниковым данным ASTER, подтверждено полевыми работами. Офиолитовые породы, интерполированные на карту Google Earth, показывают, что выявленные проявления попадают в интерпретируемую зону сдвига и зону, параллельную Мохо. Кроме того, полевые интерпретации подтверждают

наличие проявления хромитов в большей степени в складчатых областях, расположенных между сильно расланцованными серпентинизированными гарцбургитами и габбро (рис. 9).

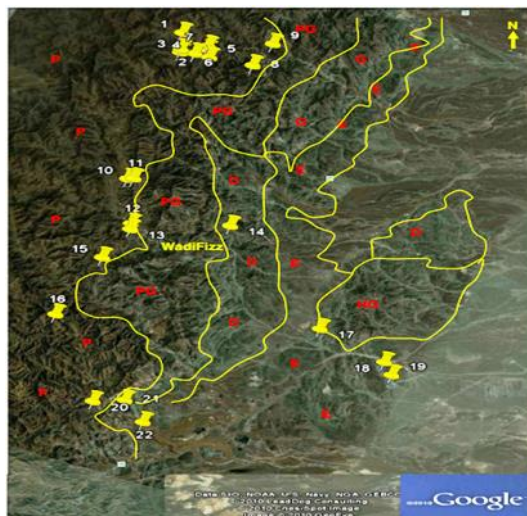


Рис. 9. Карта Google Earth: хромитовые проявления и границы интерпретированных офиолитовых пород.

## 7. Выводы.

1. ДДЗ Landsat TM и ASTER, обработанные в спектральные области длин волн VNIR и SWIR позволяют различать литология офиолитов (гарцбургит, метагаббро, metabазальт и др.).

2. Методы декорреляционного растяжения, соотношения полос и анализа главных компонентов оказались успешными в распознавании литологии офиолитов и оконтуривании хромитоносных минерализованных зоны в офиолитах исследуемой территории.

3. В ходе полевых работ было подтверждено наличие хромитовой минерализованной зоны ниже трассы Мохо на расстоянии от 1 до 5 км в мантийных толщах.

4. Исследование показывает, что использованные методы имеют потенциал по времени и затратам при поисках дополнительных проявлений хромитов по сравнению с трудоемкими классическими методами поисков хромитов, особенно в труднодоступных районах.

#### IV. АЛГОРИТМ DEEP ISOLATION FOREST (DIF) ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕДНО-ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ *(провинция Хорасан-Резави, Иран) [3].*

##### **1. Введение.**

Картографирование перспективности рудных месторождений (МРМ) используется для снижения затрат на ГРП, минимизации рисков, уменьшения неопределённости и, в конечном счёте, для выявления потенциальных зон минерализации. МРМ объединяет геопространственные наборы данных с двумя основными подходами: методами, основанными на знаниях, и методами, основанными на данных. Подходы, основанные на знаниях, фокусируются на металлогеническом фоне и факторах минерализации, опираясь на специализированные знания в области поисков ПИ и обоснованные мнения экспертов. Однако этот подход часто сопряжён с высокой степенью неопределённости из-за зависимости от мнения экспертов. В отличие от него, методы, основанные на данных, в том числе машинное обучение, направлены на выявление взаимосвязей между известными месторождениями и слоями, а также на обнаружение скрытых взаимосвязей, связанных с минерализацией. В последние десятилетия были разработаны различные методы машинного обучения с учителем, такие как логистическая регрессия, метод опорных векторов и случайные леса, а также алгоритмы без учителя, такие как K-means и IForest, которые все чаще используются для МРМ.

В МРМ концептуальная модель и атрибуты целевого месторождения используются для извлечения характеристик, связанных с минерализацией, которые затем используются для создания слоя данных. Высокие значения в каждом слое данных имеют сильную связь и значительную корреляцию с известными рудными месторождениями. Эти слои данных имеют аномальные значения, связанные с минерализацией. Эти аномалии представляют собой важные особенности, связанные с искомой минерализацией, и демонстрируют нелинейное и сложное поведение. Следовательно, методы машинного обучения, основанные на обнаружении аномалий, могут использоваться для идентификации минерализации и моделирования её сложного, скрытого и нелинейного поведения. Эти методы могут распознавать закономерности, которые трудно обнаружить с помощью традиционных методов. Другими словами, алгоритмы обнаружения аномалий используются для выявления значимых аномалий и закономерностей в геопространственных наборах данных из нескольких источников.

Алгоритмы машинного обучения для обнаружения аномалий способны выявлять аномалии и анализировать многомерные, сложные и нелинейные данные, а также скрытые структуры. При интеллектуальном анализе данных обнаружение аномалий направлено на выявление точек данных, которые значительно отклоняются от нормального распределения. Основная функция интеллектуальных алгоритмов, основанных на обнаружении аномалий,

заключается в распознавании точек данных, которые отличаются от остальной части набора данных по определённому показателю. Такие образцы демонстрируют необычное поведение и называются выбросами. В области поисков ПИ обнаружение аномалий применяется в различных сферах, таких как обнаружение многоэлементных геохимических аномалий и др. Модели опорных векторов (OCSVM) могут давать ценные результаты при обнаружении аномалий в многомерных данных без предположений о распределении исходных данных. Так, для выявления геохимических аномалий, связанных с полиметаллической минерализацией Ag–Pb–Zn использовали геохимические данные донных отложений и шесть методов машинного обучения без учителя. Результаты исследования показали, что алгоритм IForest является надёжным и эффективным алгоритмом машинного обучения без учителя для выявления геохимических аномалий, связанных с минерализацией, и что его интеграция с соответствующими методами уменьшения размерности может привести к более точному выявлению связанных с минерализацией аномалий. Следовательно, алгоритмы, основанные на выявлении аномалий без учителя, широко применимы в геохимии и исследованиях МРМ.

IForest, алгоритм неглубокого ансамблевого обучения на основе деревьев решений, отлично подходит для выявления аномалий в сложных геопространственных наборах данных. Основная функция алгоритма IForest заключается в выявлении аномалий путём определения того, насколько они «отличаются» от других точек данных в заданном пространстве признаков. Для обнаружения этих аномалий в пространстве решений алгоритм IForest генерирует случайные деревья расщепления, чтобы изолировать каждую точку данных. Затем для каждого дерева вычисляется количество ветвей, необходимых для разделения каждой точки. Среднее значение этого количества ветвей определяет ожидаемую длину пути, используемого для изоляции интересующей точки. Для аномалий ожидаемая длина пути обычно невелика.

В отличие от других методов, алгоритм IForest не моделирует популяции элементарных ячеек, а изолирует аномальные ячейки напрямую с помощью случайного разбиения. В исследованиях МРМ оценки аномалий, сгенерированные алгоритмом IForest, могут напрямую использоваться для идентификации аномальных ячеек на растровой карте. Однако алгоритм IForest испытывает трудности с обнаружением серьёзных аномалий в многомерном и нелинейно разделяемом пространстве данных, поскольку при построении изолирующих деревьев он выполняет только операции параллельной оси изоляции (линейное разбиение). Глубокий изолирующий лес (DIF) — это самое последнее и, вероятно, наиболее многообещающее расширение алгоритма IForest, которое предложено для устранения этого ограничения исходного алгоритма и упрощения выявления нелинейных взаимосвязей между сложными характеристиками. Алгоритм DIF устраняет это ограничение с помощью случайно

инициализированных нейронных сетей, которые проецируют данные в ансамбли случайных представлений, в которых сложные аномалии можно легко изолировать с помощью параллельных осей срезов, что соответствует нелинейному разделению в исходном пространстве.

Целью этого исследования является моделирование минерального потенциала гидротермальных медно-порфировых м-ний и оценка эффективности алгоритмов IForest и DIF. Чтобы оценить эффективность этих алгоритмов, провели тематическое исследование в рудном районе Фейзабад. Были разработаны 14 слоёв данных на основе концептуальной модели искомого м-ния. Затем эти алгоритмы были использованы для создания карт минерального потенциала. Результаты были оценены с помощью кривой вероятности успеха.

## 2. Геология исследуемого района.

Исследуемая территория площадью 1,2 тыс км<sup>2</sup> расположена в северной части провинции Хорасан-Резави, которая находится между центральным Ираном и блоком Лут (рис. 1).

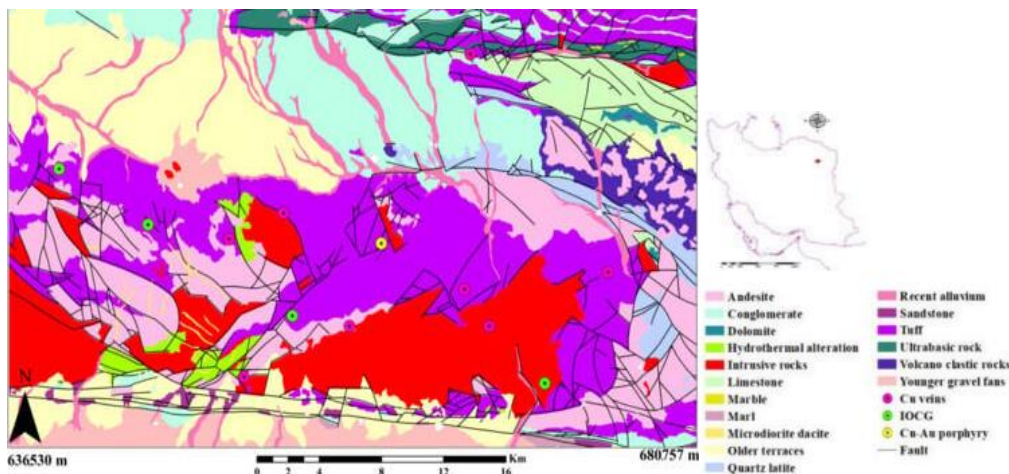


Рис. 1 Упрощенная геологическая карта рудного района Фейзабад.

Движения разломов существенно повлияли на изменения в составе горных пород в этом районе. Разлом Дорунех, проходящий через центр района и разделяющий исследуемую территорию на северную и южную части, является одним из основных разломов в этом районе. Вулканические и пирокластические породы третичного возраста встречаются в основном в северной части этого разлома. Помимо интрузивных пород, в северной части района также присутствуют осадочные породы. Туфы в этом районе часто имеют состав от риолитового до риодацитового, а лава содержит андезит. Интрузивные породы эоценового и олигоценевого периодов в виде гранодиорита и диорита в основном встречаются в северной части. Преобладающими категориями м-ний в исследуемой области, вблизи интрузивных и вулканических пород, являются м-ния IOCG и порфировые системы Cu–Au. Помимо

вышеупомянутой минерализации, выявлены зоны гидротермальных изменений, связанные с гранодиоритами и гранитами. Наиболее важными зонами изменений являются зоны оксидов железа, кремниевые, пропилитовые, филлитовые и аргиллитовые зоны. Эти изменения часто происходят вдоль разломов и вблизи интрузивных пород. Разломы и трещинные зоны, по которым происходит движение флюидов, играют решающую роль в формировании оруденения. Первичные рудные минералы в основных зонах минерализации состоят в основном из пирита, халькопирита, магнетита, сфалерита и золота, в то время как вторичные минералы — гетит, гематит, малахит и азурит — распространены в окисленных зонах.

### **3. Концептуальная модель.**

Одним из важнейших этапов МРМ является определение подходящей концептуальной и описательной модели для искомой минерализации. Концептуальная модель включает в себя ключевые характеристики и критерии искомой минерализации и определяется на основе характеристик аналогичных известных м-ний. Важные слои-индикаторы для МРМ выбираются в соответствии с этой описательной моделью. Для построения модели перспективности медно-порфириковых м-ний меди были использованы следующие ключевые характеристики.

Медно-золотые порфиры, в районе Фейзабада демонстрирует значительную пространственную корреляцию с интрузивными породами, такими как диорит и гранодиорит переходного периода от эоцена к олигоцену. Близость к этим породам, которые служат основным источником рудных флюидов является важным показателем для выявления новых поисковых объектов в районе.

Образование медно-золотой минерализации связано с движением богатых металлами флюидов по трещинам и разломам. Эти структуры, особенно их пересечения, служат проводниками для движения флюидов. Таким образом, близость к пересечениям разломов можно считать ключевым фактором и важным слоем в МРМ-анализе.

Геохимические поиски является ключевым методом выявления гидротермальных м-ний меди. Предыдущие исследования, проведённые в исследуемом районе, продемонстрировали тесную связь между такими элементами, как Cu, Au, Hg, Pb, Zn, Sn, As и Sb. Кроме того, результаты показывают, что геохимические карты этих элементов в точности соответствуют известной гидротермальной медной минерализации в регионе. Поэтому для этого исследования были выбраны эти восемь элементов.

В целом, гидротермальные изменения, связанные с оксидом железа, являются основными характеристиками гидротермальных м-ний, таких как порфириковая медная минерализация. Зоны изменений, такие как калиевые, филлитовые, аргиллитовые и пропилитовые зоны, а также

изменения, связанные с оксидом железа, обычно встречаются вблизи гидротермальных медных м-ний и имеют значительную протяжённость. Поэтому в исследовании для выявления областей, в которых наблюдаются эти изменения, использовалась обработка ДДЗ ASTER.

#### 4. Материалы и методы.

МРМ обычно использует и объединяет несколько типов данных, включая геохимические, геофизические, ДДЗ и геологические. Такая интеграция позволяет провести комплексную оценку геологических особенностей и аномалий, которые могут указывать на наличие м-ний.

##### 4.1. Геохимический отбор проб регионального масштаба.

В исследуемом регионе точечные данные можно разделить на две категории: точки минерализации (известные как проявления или месторождения полезных ископаемых) и геохимические данные по отложениям в руслах рек. Первые использовались для оценки перспективных моделей, а вторые — для создания геохимических слоёв. Для сбора образцов была создана систематическая сеть пробоотбора с размером ячейки 1400×1400 м в масштабе 1:100 000. Отложения в руслах рек были собраны в каждом окне сетки. Все собранные образцы в каждом окне были перемешаны, и в центр окна был помещён объединённый образец. Эти образцы были проанализированы в лаборатории Цзян Чэна на наличие 28 элементов методом индуктивно-связанной плазмы — оптической эмиссионной спектрометрии (ICP-OES), а на наличие золота (Au) — методом пробирного анализа с использованием соответствующих процедур подготовки и кодирования. После анализа данные были подвергнуты строгому процессу контроля качества (QC). Это включало проверку точности результатов с использованием эталонных стандартов, повторный анализ важных образцов и выполнение различных статистических оценок.

Северная часть геологической карты масштаба 1:100 000 в Фейзабаде состоит из осадочных пород, различных типов туфов, вулканических и пирокластических пород третичного возраста, а также интрузивных пород эоцен-олигоценного возраста. Для создания геохимических слоёв было использовано 587 образцов донных отложений (рис. 2).

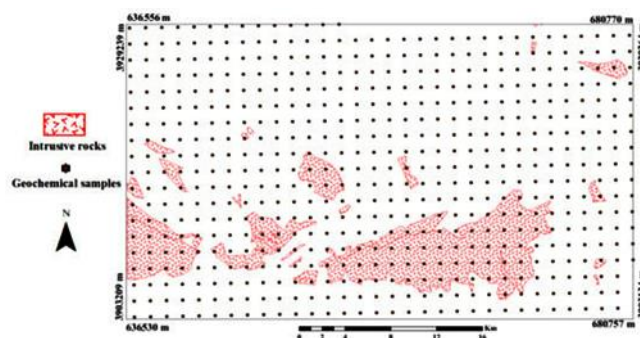


Рис. 2 Схема пробоотбора донных отложений в исследуемой зоне.

Исследования в регионе Фейзабад выявили заметную корреляцию между гидротермальной медной минерализацией и различными элементами, такими как Cu, Zn, Pb, Au, Sn, Hg, As и Sb. В результате были рассчитаны и проанализированы основные статистические параметры для этих элементов. Взаимосвязь между Cu и ключевыми элементами показана на рисунке 3.

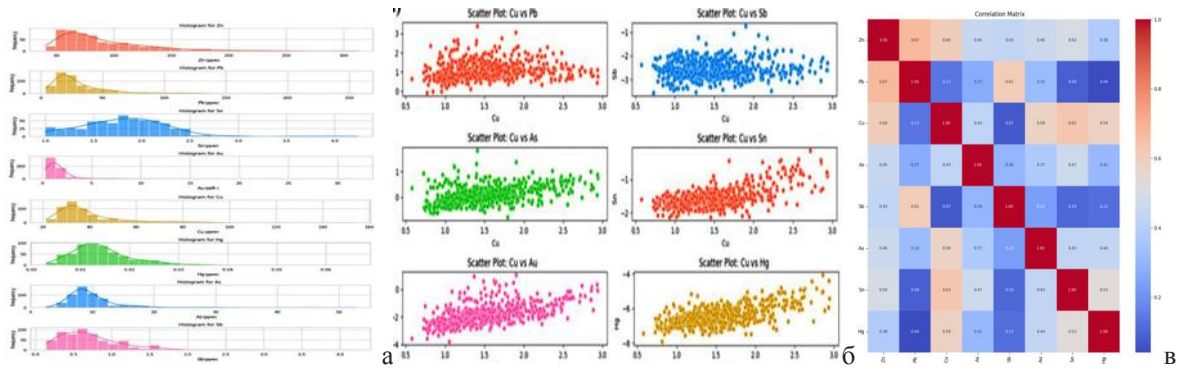


Рис. 3 Гистограммы ключевых элементов (а), взаимосвязь между Cu и ключевыми элементами (б) и тепловая карта корреляционной матрицы (в).

#### **4.2. Данные дистанционного зондирования и предварительная обработка.**

Датчик ASTER делает снимки шириной 60 км и отображает их как стандартные изображения размером 60×60 км. Этот датчик обеспечивает высокое качество изображений с хорошим соотношением сигнал/шум и может делать стереоскопические снимки для создания цифровой модели рельефа. Спутниковые снимки ASTER широко используются в геологических исследованиях и для выявления гидротермальных изменений, связанных с рудной минерализацией, благодаря их отличному пространственному и спектральному разрешению, особенно в коротковолновых инфракрасных (SWIR) диапазонах. Изображения ASTER были скорректированы с учётом влияния атмосферы с помощью метода IARR (внутреннее среднее относительное отражение), а данные о яркости были преобразованы в значения отражения.

#### **4.3. Геологические данные**

Геологические данные предоставляют важную информацию для поисков м-ний и создания моделей перспективности. Двумерные геологические карты показывают основную информацию о различных литологических единицах и распределении разломов и их пересечениях. Эта информация ценна для создания оценочных слоёв. Для этого исследования использовалась оцифрованная карта литологических единиц и разломов в районе Фейзабада. Анализ геологических единиц и структур разломов с помощью этих карт помогает глубже понять закономерности, связанные с минерализацией.

## 5. Методология исследования.

Рисунок 4 иллюстрирует методологическую блок-схему, использованную в этом исследовании для анализа геопространственных данных и создания модели минерального потенциала для гидротермальных м-ний меди в районе Фейзабада.

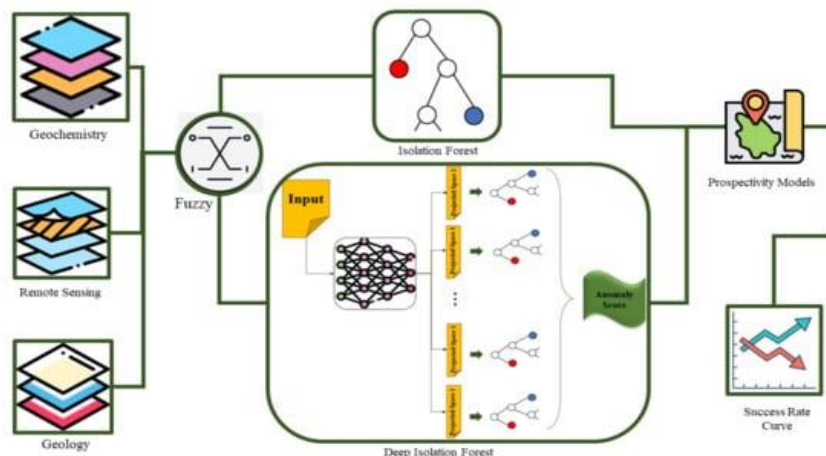


Рис. 4 Рабочий процесс, примененный в этом исследовании для создания моделей перспективности.

На первом этапе с помощью соответствующих аналитических методов были созданы геохимические, геологические и слои дистанционного зондирования. Чтобы уменьшить неопределённость и повысить точность результатов, мы использовали логистические функции для преобразования значений в нечёткое пространство [6,51]. На следующем этапе мы использовали интеллектуальные алгоритмы, а именно алгоритмы IForest и DIF, для объединения геопространственных данных и выявления аномалий. Наконец, для оценки перспективности моделей мы использовали кривую успешности на основе данных.

### 5.1. Логистическая функция/

В МРМ используются различные слои данных с учётом концептуальной модели искомой минерализации. Поскольку эти слои различаются по своим размерам, для нормализации или масштабирования неограниченных данных для интеграции необходим этап взвешивания. В связи с этим использовалась следующая логистическая функция:

$$F_E = \frac{1}{1 + e^{-s(E-i)}} \quad (1)$$

где  $F_E$  — значение нечёткой принадлежности; назначенная нечёткая оценка  $s$  — это наклон логистической функции;  $i$  — точка перегиба логистической функции;  $E$  — взвешенное нечёткое свидетельство, попадающее в диапазон [0, 1].

Кроме того, значения  $i$  и  $s$  получаются из уравнений (2) и (3) соответственно:

$$i = \frac{E_{max} + E_{min}}{2} \quad (2)$$

$$s = \frac{9.2}{E_{max} - E_{min}} \quad (3)$$

### 5.2. Изолирующий лес.

Алгоритм IForest — это широко используемый метод обнаружения аномалий без учителя, основанный на деревьях решений (изолирующих деревьях) и использующий преимущества ансамблевого обучения. Он создаёт ансамбль изолирующих деревьев для итеративного разделения данных с помощью случайного разбиения и для изоляции аномалий. Изолирующее дерево состоит из подмножества данных, начинающегося с корневого узла и переходящего в изолированный конечный узел путём рекурсивного разделения данных на более мелкие подмножества до тех пор, пока каждый образец не будет изолирован (рис. 5).

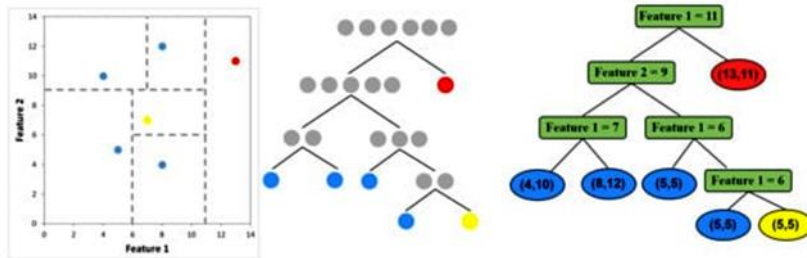


Рис. 5 Схема изолирующего дерева, разделяющего образцы с помощью параллельных срезов.

Эта концепция предполагает, что для отделения аномалий от других выборок (нормальных выборок) требуется меньше разбиений. Основное преимущество алгоритма IForest заключается в том, что он может обнаруживать аномалии без моделирования или профилирования данных, используя тот факт, что аномалии отличаются по некоторым признакам.

Алгоритм IForest присваивает оценку аномалии, вычисляя средний путь, необходимый для изоляции образца во всех изолирующих деревьях. Для каждого образца длина пути ( $h(x)$ ) — это количество рёбер, проходящих от корневого узла к изолированному конечному узлу. Поскольку ожидается, что аномальные образцы должны быть легко изолированы, у них относительно более короткий средний путь. Средняя длина пути ( $c(n)$ ) и оценка аномалий ( $s$ ) может быть рассчитан для данной выборки  $x$  следующим образом:

$$c(n) = 2H_{(n-1)} - \left( \frac{2(n-1)}{n} \right) \quad (4)$$

$$s(x, n) = 2^{-\frac{E(h(x))}{c(n)}} \quad (5)$$

где  $n$  количество выборок данных, используемых для обучения;  $H(i)$  может быть рассчитана по формуле  $\ln(i)+0,5772156649$ ;  $c(n)$  используется для нормализации  $h(x)$ ; и  $E(h(x))$  среднее значение  $h(x)$  из набора изолированных деревьев.

Количество деревьев (оценщиков) и максимальное количество признаков являются основными гиперпараметрами алгоритма IForest. Первый параметр напрямую влияет на производительность модели таким образом, что чем больше деревьев, тем выше производительность модели. Второй параметр определяет количество признаков, которые будут случайным образом выбраны и впоследствии использованы для расщепления при построении каждого дерева.

### 5.3. Лес глубокой изоляции.

Глубокий изолирующий лес (DIF)— это новый гибридный алгоритм, который объединяет случайно инициализированные (т. е. неоптимизированные) глубокие нейронные сети (DNN) и IForest, чтобы использовать преимущества обоих методов. Общая процедура DIF заключается в том, что случайно инициализированная DNN проецирует исходные данные в набор случайных пространств представления (рис. 6).

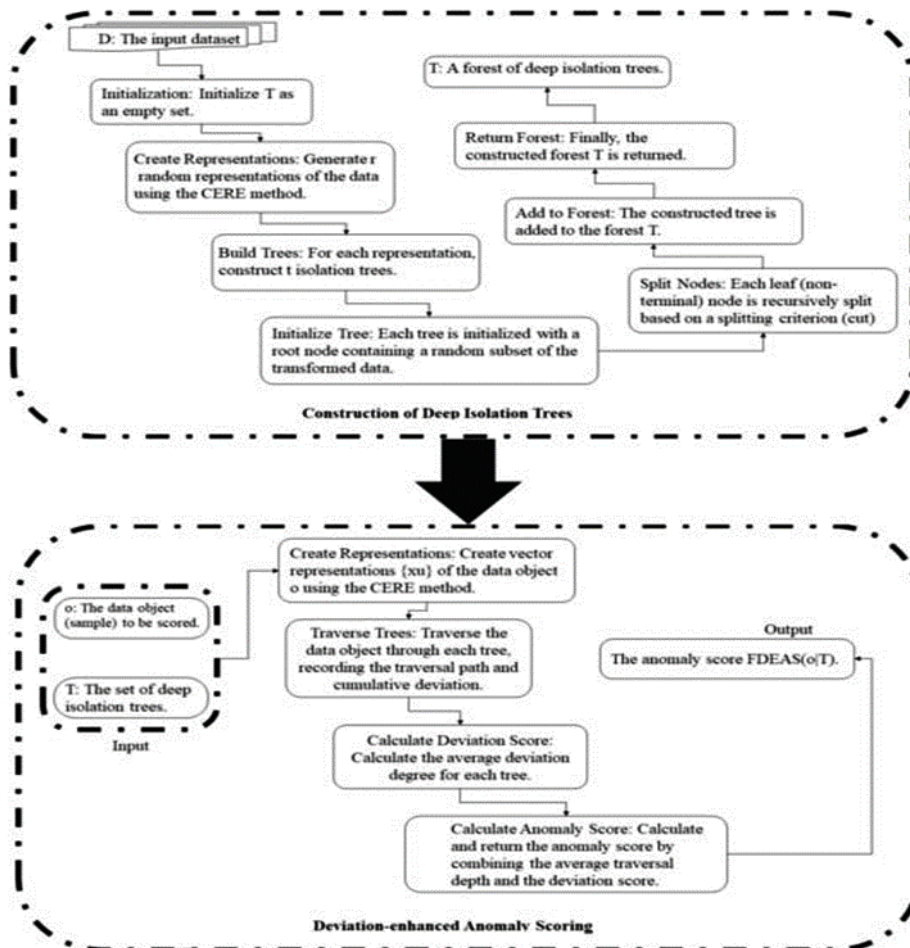


Рис. 6 Рабочий процесс алгоритма DIF.

Затем классический алгоритм IForest применяет простые параллельные оси разрезы в этих вновь созданных пространствах данных для выявления аномальных образцов. Основная цель случайно инициализированной DNN — лучше выявлять сложные аномалии, которые нелегко

выделить в исходных данных. Случайно инициализированная DNN смогла выявить сложные аномалии во вновь созданных пространствах, где аномальные выборки можно было выделить с помощью простых параллельных осей разбиений. Эти параллельные осям разрезы в проецируемом пространстве данных соответствуют сложным и нелинейным разбиениям в исходном пространстве данных.

## **6. Создание непрерывных слоев доказательств.**

### ***6.1. Слои геохимических свидетельств***

Выявленные цели служат в качестве перспективных участков, которые следует дополнительно изучить на более поздних этапах ГРР.

Геохимические исследования, которые необходимы для понимания распределения и поведения элементов, связанных с минерализацией, играют решающую роль в МРМ, особенно в региональном масштабе. Поисковая геохимия сосредоточена на анализе микроэлементов, которые, как правило, связаны с первичной минерализацией, с упором на выявление «первичных» и «вторичных» ореолов, которые образуются в результате естественного рассеивания микроэлементов. Эти ореолы обычно находятся вблизи минерализации и должны быть точно определены для эффективной разведки. Изучение вторичных ореолов и их корреляция с местами минерализации являются важнейшими аспектами выявления новых объектов разведки. При анализе геохимических данных о донных отложениях в региональном масштабе выделение геохимических аномалий, связанных с минерализацией, и создание карт геохимических аномалий являются важными составляющими МРМ. Слой геохимических аномалий является важнейшим компонентом для успешного выявления участков с потенциальной минерализацией, особенно для м-ний гидротермальной меди.

Для определения геохимических аномалий и создания слоев данных для МРМ в региональном масштабе были разработаны различные методы и концепции. Эти методы в первую очередь направлены на изучение поведения и геохимических характеристик элементов, которые положительно коррелируют с минерализацией. Другими словами, слои данных создаются в соответствии с концептуальной моделью искомой минерализации. При МРМ с использованием алгоритмов обнаружения аномалий важно использовать слои данных, которые подходят для решения задачи и имеют высокую корреляцию с целевой минерализацией. При использовании методов обнаружения аномалий без учителя слои данных лучше создавать на основе концептуальной модели целевой минерализации. Поэтому в этом исследовании использовалась информация о восьми геохимических элементах в соответствии с концептуальной моделью искомой минерализации, а значения этих слоёв были преобразованы

в пространство 0 и 1 с помощью логистической функции. На рисунке 7 показаны результирующие слои.

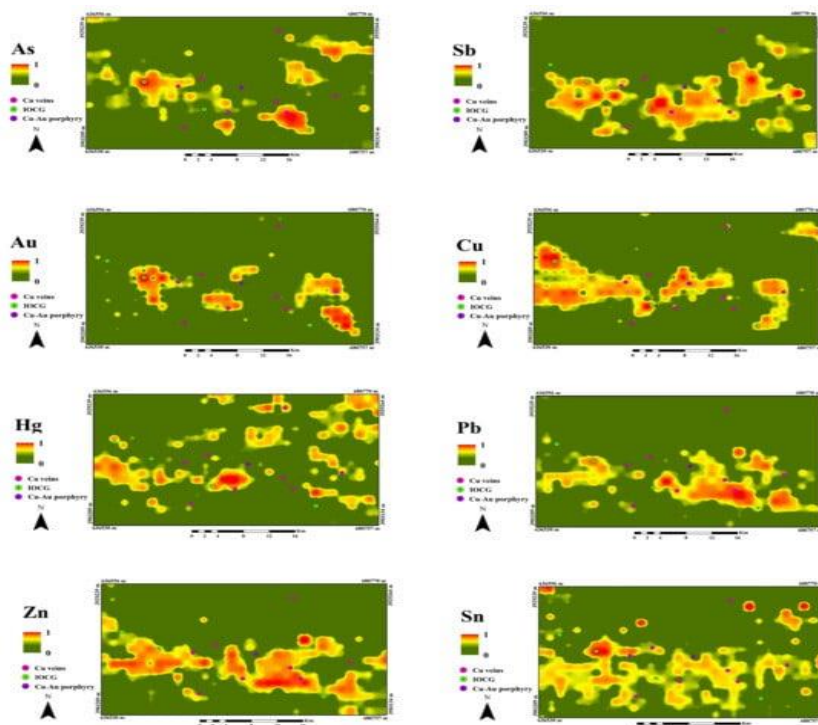


Рис. 7 Слои геохимических свидетельств, связанные с медной минерализацией в районе Фейзабада.

### **6.2. Близость к зонам гидротермальных изменений.**

Для эффективного моделирования потенциала минерализации м-ний меди необходимо учитывать различные факторы, в том числе геологические особенности, связанные с гидротермальными изменениями, влияющими на минерализацию. В этом контексте ДДЗ играют важнейшую роль в точном картировании поверхностного распределения этих изменений, в том числе глинистых, филлитовых, пропилитовых и оксидных, которые являются основой для точной геологической оценки. В этом исследовании с помощью снимков ASTER были выявлены зоны гидротермальных изменений, связанные с медными м-ниями в районе Фейзабада. Для обработки снимков ASTER были использованы методы Band Ratio и Spectral Angle Mapper (SAM), чтобы точно определить и разграничить зоны гидротермальных изменений. Для определения зон изменения глинистых, филлитовых и пропилитовых пород были использованы соотношения полос 4/2, 5/6, 7/6 и 8/9. Метод SAM был применён к выбранным эталонным минералам, таким как каолинит, мусковит и хлорит. Спектральные характеристики поглощения эталонных минералов в ближнем инфракрасном диапазоне на изображении ASTER были использованы в качестве спектрального диапазона для определения зон изменения глинистых, филлитовых и пропилитовых пород. Каолинит в полосах 5 и 6 (от 2,145 до 2,225 мкм) использовался для картирования аргиллитовой зоны, мусковит в полосах 6

и 7 (от 2,185 до 2,285 мкм) — для определения филлитовой зоны, а хлорит в полосах 8 и 9 (от 2,295 до 2,430 мкм) — для определения пропилитовой зоны. Затем с помощью статистических методов были определены пороговые значения (среднее значение + 2 стандартных отклонения), и все области, в которых были обнаружены зоны изменений, были нанесены на одну полосу. На рисунке 8 показана карта пространственного распределения этих зон гидротермальных изменений и их пространственная взаимосвязь с известными м-ниями, интрузивными породами и разломами.

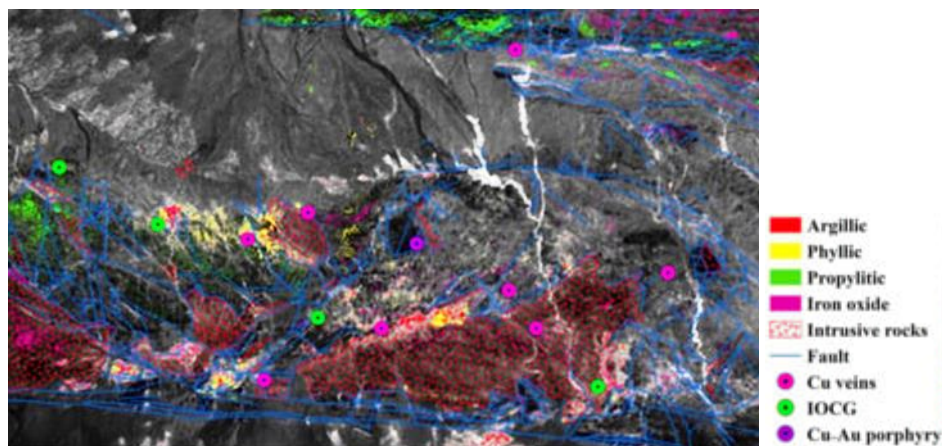


Рис. 8 Карта распределения гидротермальных изменений и их взаимосвязи с м-ниями, интрузивными породами и разломами.

Учитывая сильную корреляцию между выявленными зонами изменений и геологическими свидетельствами, гидротермальные изменения считаются ключевым показателем для поисков м-ний меди. После определения границ этих зон изменений были созданы четыре слоя свидетельств на основе расстояний (рис. 9).

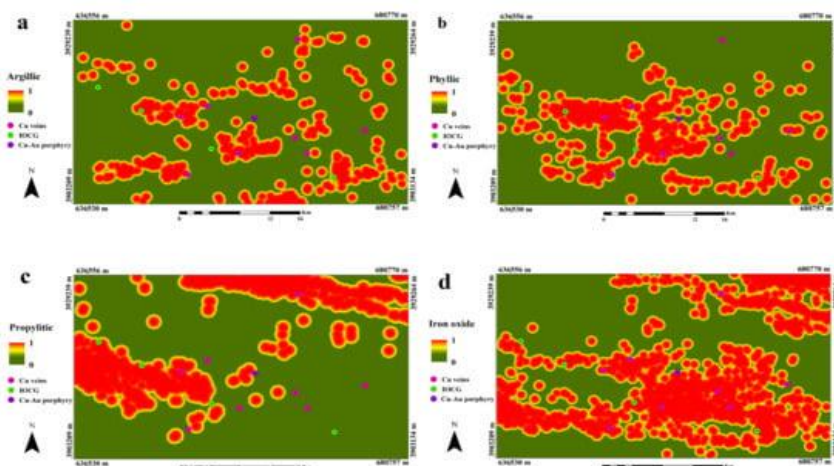


Рис. 9 Слои-свидетели: (а) зоны аргиллитовых изменений; (б) зоны филлитовых изменений; (с) зоны пропилитовых изменений; и (д) зоны изменений, связанных с оксидом железа.

Эти слои свидетельств значительно улучшают моделирование потенциальных м-ний меди, поскольку предоставляют важные пространственные данные о гидротермальных изменениях и, таким образом, повышают эффективность поисков.

### 6.3. Близость к интрузивным породам.

М-ния меди, такие как медно-порфировые и медные жилы, а также другие гидротермальные системы, часто встречаются в тесной связи с интрузивными породами, такими как гранит, гранодиорит и диорит, относящимися к эоцен-олигоценному периоду в исследуемой области. Эти интрузивные породы сыграли решающую роль в формировании рудных м-ний в Фейзабаде, поэтому близость к этим породам значительно повышает вероятность обнаружения м-ний. Следовательно, ГРР в районах, близких к этим интрузивным породам, более перспективны, чем в более удалённых районах. Чтобы создать соответствующий слой данных, связанный с интрузивными породами, интрузивные образования сначала были оцифрованы с помощью ArcMap 10.8. Затем был создан слой, отражающий близость к интрузивным породам. Впоследствии значения этого слоя были преобразованы в нечёткое пространство с помощью логистической функции, чтобы повысить точность и интерпретируемость и снизить неопределённость при анализе МРМ. Рисунок 10 иллюстрирует созданный слой данных и показывает сильную пространственную корреляцию между известными м-ниями и этими слоями.

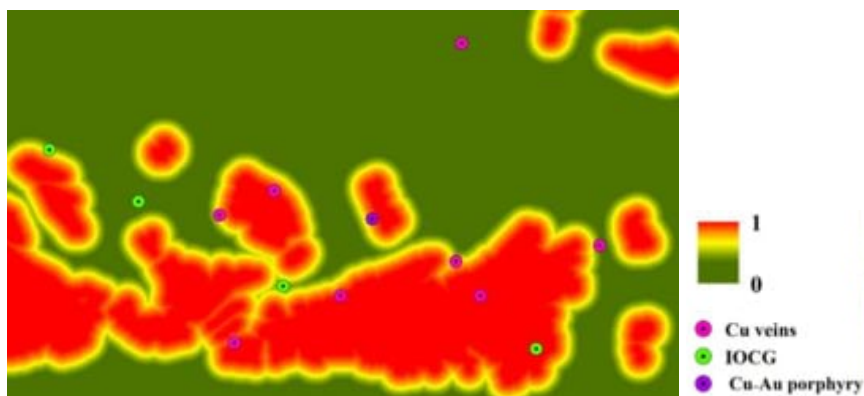


Рисунок 11. Близость к интрузивным породам в районе Фейзабада.

Таким образом, эту карту можно использовать в качестве надёжного и фундаментального слоя при составлении карт перспективности гидротермальных м-ний меди.

### 6.4. Близость к пересечению разломов.

Исследования показали, что структурные аномалии играют важнейшую роль в повышении проницаемости и способствуют образованию рудных м-ний. Следовательно, можно предположить, что большая часть рудной минерализации происходит в непосредственной близости от этих структурных особенностей. Таким образом, гидротермальные м-ния меди имеют уникальные и прямые пространственные и генетические связи с разломами. Разломы играют важную роль в формировании этих м-ний и могут существенно влиять на распределение

изменений. Структурные нарушения, такие как разломы, широко известны как основной признак наличия гидротермальных м-ний. Гидротермальные флюиды перемещаются по породе по разломам и трещинам, особенно в местах их пересечения. Эти места пересечений считаются оптимальными для гидротермальной минерализации из-за их повышенной проницаемости. В районе Фейзабада расстояние между местами пересечений разломов было определено как ключевой структурный фактор, определяющий гидротермальную минерализацию. В ходе этого исследования сначала была создана карта близости к пересечениям разломов (рис. 11).

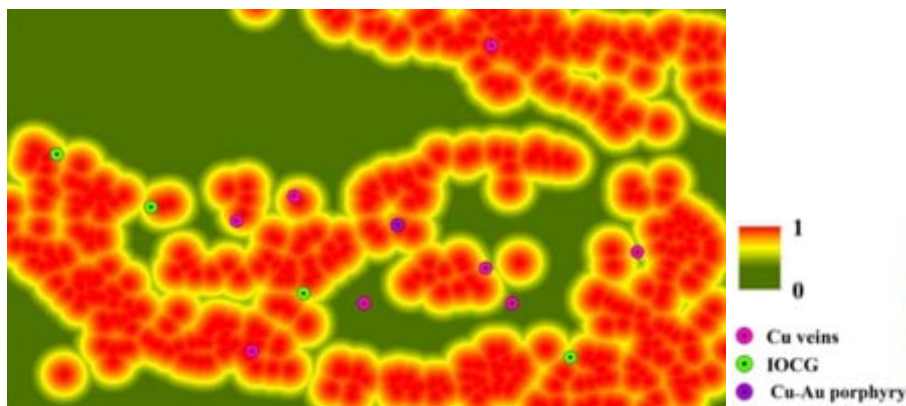


Рис. 11 Близость м-ний к пересечению разломов в исследуемой области.

Затем эти данные были взвешены с помощью логистической функции. Полученная карта была использована для моделирования потенциала минерализации гидротермальных м-ний меди.

## 7. Результаты и анализ.

### 7.1. Оптимизация неконтролируемых алгоритмов обнаружения аномалий

Настройка гиперпараметров имеет первостепенное значение для производительности алгоритмов машинного и глубокого обучения, в том числе алгоритмов IForest и DIF. Оптимальный выбор этих параметров зависит от конкретных характеристик используемого набора данных. Например, алгоритм IForest включает в себя такие важные параметры, как максимальное количество признаков и количество деревьев. Эти гиперпараметры были оптимизированы в рамках данного исследования. Аналогичным образом, алгоритм DIF включает в себя такие параметры, как количество деревьев и количество ансамблевых представлений, которые были тщательно оптимизированы для повышения производительности алгоритма.

Для определения подходящих параметров обычно требуется использование эталонных выборок. Как правило, оптимальные параметры определяются путем построения кривой ROC и оценки AUC на основе этих выборок. Точность кривой ROC зависит как от положительных,

так и от отрицательных эталонных выборок. Однако в исследованиях MPM, особенно на региональном уровне, отрицательные выборки могут быть недоступны. В таких случаях отрицательные выборки отбираются с учетом различных ограничений. Однако этот выбор по своей сути случаен, что делает процесс серьёзной проблемой и значительным источником неопределённости в MPM.

Для выбора оптимальных гиперпараметров алгоритма IForest и DIF была использована методика оценки, обычно применяемая в MPM, — кривая вероятности успеха. Эта кривая не основана на помеченных отрицательных образцах и, таким образом, минимизирует неопределённость. Поэтому в рамках данного исследования были разработаны различные модели с разными настройками параметров, и для каждой модели была построена кривая вероятности успеха. Среди всех моделей наиболее эффективными были признаны две. Систематически исследовали оптимальные гиперпараметры для двух используемых алгоритмов. К ним относятся количество деревьев (установлено на 1000) и максимальное количество признаков (установлено на 14) для алгоритма IForest, а также количество представлений (установлено на 5) и количество деревьев (установлено на 100) для алгоритма DIF. Модели IForest и DIF реализованы с использованием Sklearn 1.0.2 и PyOD 2.0.2 соответственно в среде Python 3.8.

## ***7.2. Интеграция непрерывных слоев данных.***

### ***7.2.1. Модель перспективности iForest.***

Регион Фейзабад характеризуется наличием интрузивных пород — гранодиоритов и диоритов, которые способствовали развитию зон гидротермальных изменений и связанной с ними гидротермальной медной минерализации. Благоприятная тектоническая обстановка в регионе способствует формированию такой минерализации, которая часто проявляется в обогащении такими элементами, как медь, сурьма, мышьяк, золото, цинк, свинец и другие микроэлементы. Чтобы определить потенциальные зоны минерализации сначала создали 14 слоёв данных (рис. 7-11) на основе характеристик минерализации и концептуальной модели. Учитывая, что следы, связанные с минерализацией, — редкое явление с низкой вероятностью возникновения, применили алгоритмы машинного обучения, специально разработанные для обнаружения аномалий. Среди этих алгоритмов был выбран алгоритм IForest из-за его эффективности в обнаружении таких аномалий. Применили алгоритм IForest для составления карты перспективности  $m$ -ной гидротермальной меди (рис. 12).



Рис. 12 Модель перспективности IForest в регионе Фейзабад.

Сравнительный анализ полученной модели перспективности (рис. 12) и геологической карты (рис. 1) показывает, что области с наибольшей вероятностью минерализации, характеризующиеся высокими значениями перспективности, тесно связаны с трещиноватыми андезитами и сопутствующими интрузивными породами. Кроме того, эти аномальные зоны демонстрируют сильную корреляцию с сильно трещиноватыми туфами. Корреляция между известными м-ниями и областями высокой перспективности подтверждает надёжность модели, созданной с помощью алгоритма IForest. Полученные результаты подчёркивают эффективность метода IForest при выделении перспективных зон для гидротермальной медной минерализации. Однако, алгоритм IForest имеет ограничения в определённых регионах и не справляется с распознаванием некоторых известных м-ний. Этот недостаток может быть связан с тем, что алгоритм с трудом распознаёт сложные и нелинейные геологические закономерности, характерные для сложных районов. Следовательно, для повышения точности перспективного картирования необходимо использовать более продвинутые методы, такие как алгоритм DIF.

#### 7.2.2. Модель перспективности Deep Isolation Forest.

Аномалии в слоях горных пород часто демонстрируют сильную пространственную корреляцию с искомой минерализацией, несмотря на сложное и нелинейное поведение. Для эффективного выявления таких аномалий можно использовать передовые алгоритмы обнаружения аномалий, такие как алгоритм DIF. В этом исследовании для создания карты перспективности региона Фейзабад был использован алгоритм DIF, являющийся расширением классического алгоритма IForest (рис. 13).

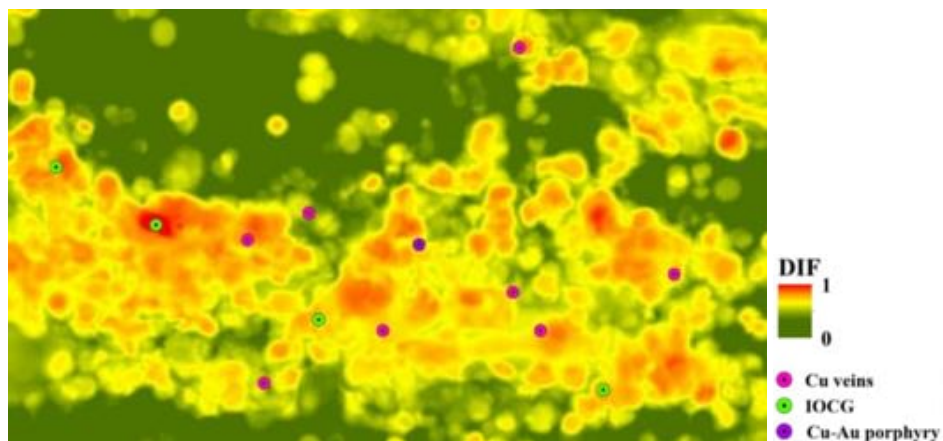


Рис. 13 Модель перспективности DIF в регионе Фейзабад.

В некоторых случаях этот алгоритм превзошёл классический алгоритм IForest в точном выявлении скрытых и сложных аномалий. Например, он продемонстрировал повышенную эффективность при обнаружении известных рудных м-ний в центральной и северной частях района, где классический алгоритм IForest сталкивался с ограничениями. Это подчёркивает способность мощных и оптимизированных интеллектуальных алгоритмов моделировать нелинейное и сложное геологическое поведение, тем самым выявляя области, которые сложно обнаружить с помощью базового алгоритма IForest.

Для оценки и проверки перспективности моделей, созданных с помощью методов IForest и DIF, была применена кривая успешности. Эта кривая является одним из наиболее мощных и широко признанных инструментов для оценки прогностических возможностей модели и позволяет измерить её точность. Оценка анализирует пространственную корреляцию между известными м-ниями и классификациями, полученными с помощью каждой модели. Кривые успешности особенно эффективны при сравнении эффективности различных моделей прогнозирования м-ний. С точки зрения MPM, подходящие модели прогнозирования должны предсказывать большее количество известных м-ний на меньшей площади. Соответственно, метод оценки должен способствовать установлению взаимосвязи между различными классами карт и известными м-ниями. Для этого сначала карту классифицировали, а затем построили кривую успешности для оценки точности классификации. Эта кривая показывает пространственное соответствие между благоприятной областью и расположением известных м-ний. Для построения кривой вероятности успеха из значений MPM в прогностической модели определяются различные пороговые значения. Затем доля прогнозируемых м-ний сравнивается с долей в благоприятной зоне.

Как показано на рисунке 14, кривые успешности для моделей IForest и DIF выходят за пределы контрольной линии, что указывает на то, что обе модели прогнозирования успешно установили положительную взаимосвязь с известными м-ниями.

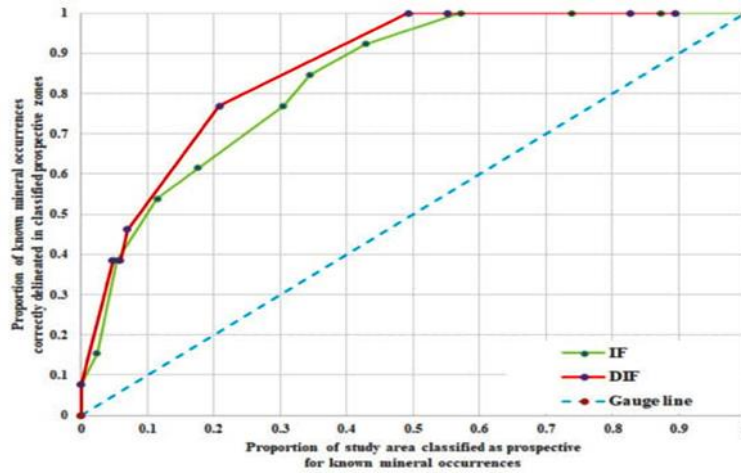


Рис. 14 Кривые вероятности успеха для моделей перспективности IForest и DIF.

Кривая, связанная с моделью перспективности, полученной с помощью метода DIF, работает лучше, чем модель IForest. Это свидетельствует о том, что метод DIF лучше выявляет нелинейные и сложные аномалии, связанные с минерализацией, и подчёркивает его эффективность при составлении прогнозных карт.

## 8. Обсуждение.

Алгоритмы обнаружения аномалий без учителя обеспечивают надёжный метод выявления зон с высоким потенциалом минерализации МРМ, особенно на неосвоенных территориях, где нет размеченных данных. Эти алгоритмы не сталкиваются с проблемами, связанными с методами МРМ на основе размеченных данных, которые возникают из-за особенностей геопространственных наборов данных и редкости минерализации. Алгоритмы без учителя могут работать без эталонной выборки, в отличие от методов на основе размеченных данных, которые могут быть затруднены редкостью событий минерализации и в значительной степени зависят от чётко определённых наборов обучающих данных. Независимость от размеченных данных повышает надёжность создаваемых моделей перспективности и значительно снижает неопределённость, связанную с результатами моделирования.

Применение этих алгоритмов является подходящим вариантом для создания моделей минерального потенциала и повышения успешности определения целей поисков. Эти алгоритмы не требуют отрицательных контрольных образцов, что значительно снижает неопределённость при моделировании перспективности. В этом исследовании применили алгоритмы обнаружения аномалий без учителя, которые способны обрабатывать сложные наборы данных с высокой размерностью. Район Фейзабад является подходящим местом для гидротермальной медной минерализации из-за своих геологических и тектонических условий.

Этот район был выбран в качестве примера для изучения. Изначально было создано 14 слоев доказательств на основе характеристик минерализации (рис. 8-12).

Минерализация — это локальное геологическое явление с низкой вероятностью возникновения, что делает его аномалией. Для исследований МРМ создаются геопространственные наборы данных на основе признаков минерализации, которые необходимо найти в исследуемой области. Поскольку высокие значения в определённых слоях данных обычно коррелируют с некоторыми известными рудными м-ниями, методы обнаружения аномалий особенно хорошо подходят для такого типа исследований. В качестве примера можно привести методы IForest и DIF, которые можно использовать для картирования областей с высоким потенциалом минерализации. Оба метода показали хорошие результаты при выявлении перспективных областей. Метод DIF превзошёл алгоритм IForest, что можно объяснить его способностью выявлять и распознавать «твёрдые» аномалии, связанные с минерализацией.

Способность метода DIF выявлять м-ния, которые не смогла обнаружить базовая модель перспективности IForest, демонстрирует его превосходство над алгоритмом IForest. Это различие обращает внимание на одно из главных преимуществ алгоритма DIF, а именно на то, что благодаря своей архитектуре на основе нейронной сети он может обрабатывать многомерные данные и сложные и нелинейные характеристики, которые часто характеризуют модели минерализации. Алгоритм IForest может испытывать трудности с обработкой сложных геологических данных и может пропускать важные аномалии.

Хотя оба метода могут выявлять потенциальные области минерализации, у каждого из них есть свои ограничения. Алгоритм IForest может испытывать трудности с моделированием сложного, нелинейного поведения, когда набор данных очень запутан, что приводит к потере перспективных областей. Это означает, что метод может не в полной мере учитывать сложность данных, особенно в областях, где следы минерализации слабо выражены. С другой стороны, у подхода DIF есть свои сложности, в основном связанные с оптимизацией гиперпараметров, хотя он лучше справляется со сложными наборами данных. Для определения оптимальных настроек гиперпараметров, которые могут существенно повлиять на точность моделей прогнозирования, требуются обширные эксперименты.

Несмотря на то, что методы без учителя, такие как IForest и DIF, не требуют размеченных наборов данных, уровень качества и применимость входных слоёв данных по-прежнему очень важны. Эти алгоритмы работают только при условии, что используемые ими слои данных являются надёжными маркерами минерализации. Даже самые продвинутые алгоритмы не смогут создать полезные и точные карты перспективности, если входные данные низкого

качества или неточно отражают процессы минерализации. Следовательно, тщательный выбор слоёв и подготовка данных имеют решающее значение.

Данное исследование подтверждает целесообразность использования методов обнаружения аномалий без учителя в процессе МРМ, особенно в тех областях, где из-за нехватки данных типичные подходы с учителем могут оказаться непрактичными. В частности, алгоритм DIF обладает потенциалом благодаря сложному управлению сложными и нелинейными взаимодействиями, что даёт ему значительное преимущество перед более простыми методами, такими как алгоритм IForest. Прежде чем использовать эти методы на практике, необходимо тщательно изучить их ограничения, особенно в отношении качества входных данных и настройки гиперпараметров. Последующие исследования должны быть направлены на совершенствование этих подходов, возможно, путём разработки более автоматизированных процедур оптимизации гиперпараметров и изучения стратегий, повышающих эффективность моделей.

## **8. Выводы.**

1. Применение методов обнаружения аномалий без учителя, в том числе Isolation Forest (IForest) и Deep Isolation Forest (DIF), доказало свою эффективность при составлении карт перспективности рудных полиметаллических м-ний (МРМ).

2. Используя многомерные геопространственные наборы данных без необходимости в размеченных данных, эти алгоритмы преодолевают многие трудности, связанные с традиционными методами обучения с учителем, особенно в регионах с ограниченным количеством положительных образцов и сложными стилями минерализации. И IForest, и DIF успешно выявили области с высоким потенциалом минерализации в районе Фейзабада.

3. DIF превзошел iForest, особенно в регионах, где географическая структура более сложная и нелинейная. Его способность использовать нейронные сети для моделирования этих сложностей позволила лучше обнаруживать зоны минерализации, которые пропустил Forest.

4. Кривые успешности дополнительно подтвердили превосходную производительность DIF, сделав его более эффективным инструментом для картирования потенциальных месторождений полезных ископаемых. Интеграция близости к зонам гидротермальных изменений, интрузивным породам и пересечениям разломов значительно повысила точность моделей. Данные дистанционного зондирования, такие как снимки ASTER, предоставили ценную информацию для выявления зон изменений, таких как аргиллитовые, филлитовые и пропилитовые области, которые сыграли решающую роль в определении высокопотенциальных минеральных зон. Кроме того, близость к пересечениям разломов и

интрузивным породам позволила выявить ключевые слои, которые ещё больше уточнили модели перспективности.

5. Несмотря на превосходную производительность DIF, для максимальной точности этих моделей по-прежнему важно уделять внимание оптимизации гиперпараметров. Хотя DIF показывает многообещающие результаты при поисках новых м-ний, его успех во многом зависит от качества входных данных и правильной настройки параметров алгоритма.

6. Алгоритмы без учителя, такие как DIF, предлагают гибкий, масштабируемый и точный подход к МРМ, особенно в сложных геологических условиях. Эти методы можно адаптировать к различным типам м-ний и сценариям поисков, что делает их бесценными инструментами для обнаружения рудных минеральных ресурсов, в том числе «скрытого» типа.

## V. СВЕРХВЫСОКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ КАРТ С ПОМОЩЬЮ U-ОБРАЗНОЙ СЕТИ В ПРОГНОЗНЫХ И ПОИСКОВЫХ ЦЕЛЯХ (*Kumai*) [7].

### 1. Введение.

На разрешение геохимических карт влияют различные факторы, в том числе методы и плотность отбора проб. Традиционные методы ручного отбора проб часто ограничены в плане стоимости и трудозатрат, что приводит к редкому расположению точек отбора проб, которые с трудом улавливают тонкую неоднородность распределения элементов. Отбор проб с низкой плотностью может выявить воспроизводимые геохимические закономерности в различных регионах, но существует проблема восстановления геохимических аномалий с высоким разрешением (HR) на основе данных с низкой плотностью и эффективной интеграции информации из нескольких источников. Она остаётся в центре внимания современных исследований.

На геохимию донных отложений влияют топография, дренажные системы, морфология долин и различные геогенные факторы, что приводит к формированию сложных пространственных закономерностей элементного состава. Геологические условия и процессы минерализации определяют форму нахождения элементов и их пространственное распределение в донных отложениях. Это приводит к значительным колебаниям геохимических показателей в зависимости от плотности отбора проб, что затрудняет геологическую интерпретацию. Разработаны несколько подходов, в том числе мультифрактальную фильтрацию, вейвлет-мультимасштабное разложение и машинное обучение, для определения масштабной инвариантности и мультифрактальных свойств геохимических полей. Кроме того, для задач классификации и прогнозирования в геохимических поисках были применены методы машинного обучения, такие как эмпирическая модальная декомпозиция (Empirical Mode Decomposition, EMD), метод опорных векторов наименьших квадратов (Least Squares Support Vector Machines, LSSVM), метод опорных векторов (Support Vector Machines, SVM) и метод k-ближайших соседей (K-Nearest Neighbors, KNN).

В последние годы развитие вычислительной техники позволило использовать ИИ. Методы глубокого обучения (ГО), которые устанавливают нелинейные связи посредством иерархического извлечения признаков, продемонстрировали значительный успех в таких областях, как обработка естественного языка и анализ изображений, а также были успешно применены в геохимии. Известные области применения включают основанные на CNN системы оценки перспективности и основанные на DNN сопоставления вероятности

зависимости концентрации элемента от минерализации. Эти достижения подчеркивают значительный потенциал парадигмы, основанной на данных, для выявления скрытых геохимических закономерностей и межмасштабных взаимосвязей.

Традиционные методы интерполяции могут в некоторой степени улучшить разрешение данных. Однако эти методы основаны на упрощенных математических моделях и обычно не позволяют восстановить высокочастотные детали, что приводит к ограниченному повышению разрешения. Технология реконструкции со сверхразрешением (SR) стала важнейшим прорывом в повышении разрешения данных. Как ключевой метод в компьютерном зрении и обработке изображений, SR генерирует выходные данные HR на основе входных данных с низким разрешением (LR) и широко применяется в таких областях, как медицинская визуализация, дистанционное зондирование, видеонаблюдение и др. Алгоритмы SR в основном делятся на методы, основанные на интерполяции, реконструкции и обучении. Среди них методы, основанные на обучении, особенно те, в которых используются архитектуры глубоких нейронных сетей, демонстрируют значительные преимущества в минимизации потери информации и восстановлении мелких деталей.

Сверточная нейронная сеть сверхразрешения (SRCNN) стала пионером в применении CNNs к SR, выполняя такие задачи, как извлечение объектов, нелинейное отображение и реконструкция изображений. Архитектура Very Deep Super-Resolution (VDSR) внедрила остаточное обучение в более глубокие сети, значительно повысив производительность восстановления. Сеть остаточного внимания к каналу (RCAN) включает механизм внимания к каналу, который обеспечивает лучшую производительность SR и более эффективное извлечение высокочастотных признаков. Архитектура U-Net, представляющая собой симметричную свёрточную нейронную сеть с кодировщиком и декодировщиком, которая часто использует концепцию остаточного проектирования, доказала свою эффективность во многих областях и предлагает жизнеспособный технический подход к SR-реконструкции геохимических карт. Существующие исследования позволили добиться прогресса в извлечении информации на разных уровнях и применении технологий ИИ. Однако использование глубокого обучения для восстановления аномалий HR на основе данных с низкой плотностью выборки — эффективная интеграция вспомогательной информации, такой как топография и геология, для повышения обобщающей способности модели — остается областью, требующей глубокого изучения. Это особенно актуально, учитывая многоисточниковую, многомасштабную и межмасштабную коррелированную природу геохимических данных.

Для исследования была выбрана территория Гули в провинции Цинхай. Используя геохимические данные о донных отложениях (10 элементов: As, Sb, Bi, Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Sn,

Мо) в масштабе 1:50 000 и 1:25 000, предлагается использовать многомасштабную U-образную сеть в сочетании с остаточными блоками для восстановления геохимических карт высокого разрешения. В качестве ограничений использовали топографические характеристики (высота, уклон, экспозиция) и векторизованные геологические карты. Используя остаточные карты HR и LR в качестве контрольных сигналов, повысили разрешение данных LR.

## 2. Геологические условия.

Исследуемая территория находится в восточной части орогенного пояса Восточный Куньлунь, занимающего площадь 2566 км<sup>2</sup>. С севера на юг она состоит из трёх тектонических единиц: магматического пояса Восточный Куньлунь, меланжевого пояса Центральный Куньлунь и аккреционного комплекса Южного склона Восточного Куньлуна. На этой территории хорошо развиты системы разломов и часто наблюдается магматическая активность. Взаимодействие между системами разломов и интрузивными породами приводит к образованию прерывистых обнажений, характерных для архитектуры орогенных поясов (рис. 1).

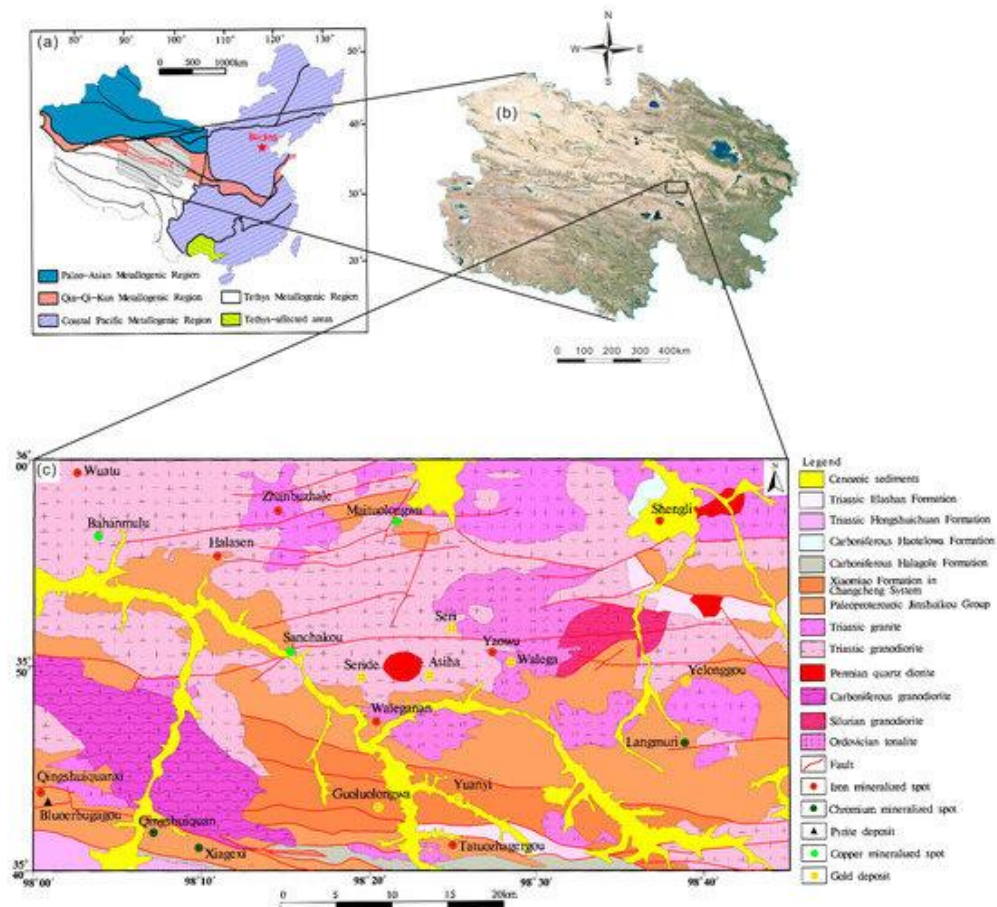


Рис. 1. Геологическая схема территории (а); карта ландшафтного районирования Китая (б) и геологическая карта провинции Цинхай с указанием района Гоули (с).

Осадочные породы в исследуемом районе преимущественно палеозойского и мезозойского возраста. В основном они состоят из обломочных пород (алевролитов, песчаников, конгломератов) с примесью известняка и сланца. Широко распространены магматические породы раннего палеозоя и мезозоя, которые в основном относятся к каледонскому, варисканскому, индосинийскому и яньшаньскому периодам и представляют собой среднекислые породы, преимущественно гранодиориты и сенеграниты, в меньшей степени тоналиты и кварцевые диориты.

Геохимические аномалии в основном сосредоточены в геологических зонах с тектонической активностью и многоэтапным внедрением интрузивных пород. Концентрация золота, серебра, меди, свинца, цинка, молибдена и вольфрама значительно выше фоновых значений в Восточном Куньлуне, что указывает на высокий потенциал для поисков. В этом районе находятся месторождения золота Гололонгва и Валега, а также месторождение меди Баханмулу и месторождение железа Сянридехарсен.

Топографически исследуемая территория расположена на высоте от 3206 до 5007 м над уровнем моря. Основной рекой является Чахан-Вуссу — бессточная система, впадающая на северо-западе в бассейн Кайдам.

### 3. Методы.

#### 3.1. Пробоотбор, подготовка образцов и методы анализа.

В районе Гули было проведено региональное геохимическое картирование в масштабе 1:50 000 и детальная геохимическая съёмка в масштабе 1:25 000 (рис. 2).

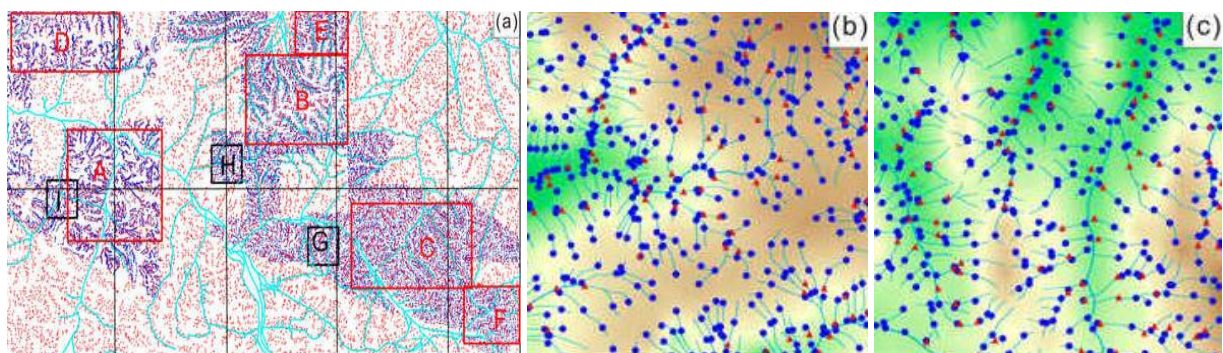


Рис. 2 Схема геохимического опробования в исследуемой области (где А–F — области обучения модели, а G–I — области проверки) (а); точки отбора проб области Н (b) и области G. (с) (синие линии -водные системы, красные точки — отбор проб для геохимического картирования в м-бе 1:50 000, синие точки — в м-бе 1:25 000).

Площадь отбора проб при геохимическом картировании в масштабе 1:50 000 больше, чем при геохимическом картировании в масштабе 1:25 000. Пересекающаяся область, охваченная обоими исследованиями, обозначена как «основная область», а вся территория, охваченная исследованием 1:50 000, — как «вся территория». Если нанести водные системы на полную

карту региона, линии будут накладываться друг на друга, а информация будет перегружена, что снизит читаемость карты. Поэтому были увеличены две репрезентативные подобласти (рис. 2b,c), чтобы наглядно продемонстрировать распределение выборки. На этих вставках показано расположение участков отбора проб для обоих исследований, а также соответствующие схемы дренажа, что позволяет лучше понять стратегию отбора проб. На вставках видно, что все участки отбора проб расположены вдоль берегов или в руслах водных систем в соответствии со стандартными протоколами отбора проб донных отложений.

Для геохимического картирования в масштабе 1:25 000 на топографических картах в масштабе 1:25 000 были обозначены водные системы и небольшие овраги длиной более 100 м. Основной принцип организации мест отбора проб заключается в том, чтобы брать большинство проб в небольших притоках длиной 100–200 м, которые можно различить на топографических картах масштаба 1:25 000, и несколько проб — в водных системах более высокого порядка, образованных слиянием небольших притоков, чтобы добиться относительной равномерности распределения проб. Плотность выборки для исследования 1:25 000 составляла 16–24 образца/км<sup>2</sup>, в результате чего было собрано в общей сложности 22 542 образца на площади около 1213 км<sup>2</sup>. Для исследования 1:50 000 использовалась та же методология размещения участков, но с меньшей плотностью — 4–8 образцов/км<sup>2</sup>, что позволило собрать 12 734 образца на большей площади — 2566 км<sup>2</sup>.

Для обоих масштабов геохимического картирования используются образцы донных отложений. Это поверхностные донные отложения из основных русел рек и прибрежные мелководные отложения из притоков и оврагов, собранные с глубины 0–15 см. При отборе образцов приоритет отдавался гидравлически активным зонам, способствующим концентрации тяжёлых минералов, таким как активные линии течения, фронты песчаных отмелей и внутренние изгибы речных русел. В качестве среды для отбора проб были выбраны фракции среднего и крупного песка, чтобы наилучшим образом представить водосборный бассейн выше по течению и избежать загрязнения золовым песком и лёссом. На каждом участке был создан единый составной образец путём сбора нескольких проб в пределах 10–25 м выше и ниже по течению. После сбора в полевых условиях образцы высушивались на воздухе, просеивались для выделения фракции размером от –2000 до +250 мкм и хранились в пакетах для образцов. Минимальная масса просеянной пробы составила 180 г для исследования 1:50 000 и 160 г для исследования 1:25 000.

Для анализа в рамках данного исследования были выбраны десять элементов (As, Sb, Bi, Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Sn и Mo) с учётом как целей исследования, так и региональных геологических особенностей. Исследуемая территория расположена на стыке Восточного

Кунылуна и горно-металлогенического пояса Эла, где известны месторождения преимущественно цветных (Cu, Pb, Zn) и драгоценных (Au, Ag) металлов. Выбранные элементы являются типичными рудообразующими или сопутствующими индикаторными элементами в этом регионе и эффективно отражают взаимосвязь между аномалиями минерализации и геохимическими полями. Такой многокомпонентный подход облегчает выявление геохимических аномалий и предоставляет фундаментальные данные для составления прогнозных карт рудных м-ний.

Геохимический анализ образцов был проведён в Центре исследования горных пород и минералов провинции Цинхай. Перед анализом лаборатория оптимизировала методологические процедуры и проверила точность, прецизионность и предел обнаружения метода (ПОМ). Для обеспечения методологической надёжности были проведены повторные измерения сертифицированных эталонных материалов (СЭМ, GBW07301–GBW07312).

На протяжении всего аналитического процесса применялся строгий протокол обеспечения и контроля качества (QA/QC) для гарантии качества данных. Образцы были предварительно обработаны: высушены, стерилизованы и измельчены до размера 75 мкм. Содержание Au определяли с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии в графитовой печи (GF-AAS). Содержание Ag, Cu, Pb, Zn, Sb, Bi и Mo анализировали с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Содержание Sn измеряли с помощью эмиссионной спектроскопии (ES), а As — с помощью атомно-флуоресцентной спектроскопии (AFS).

На каждые 50 образцов приходилось по одному CRM. Степень извлечения всех элементов составила от 90 % до 110 %, что свидетельствует об удовлетворительной точности. Примерно 5% образцов были случайным образом отобраны для повторного анализа. Относительное отклонение для большинства элементов составило менее 25%, что свидетельствует о приемлемой точности. Для каждой партии были подготовлены и проанализированы холостые пробы. Содержание всех целевых элементов в холостых пробах было ниже предела обнаружения, что подтверждает незначительное загрязнение.

Поскольку собранные геохимические данные представляют собой неевклидовы пространственные распределения, для создания сеточных данных для SR потребовалась интерполяция. Интерполяция методом кригинга была выполнена с помощью программного обеспечения Surfer11 с использованием кругового поиска с радиусом в 8 ячеек. Размер ячейки данных составляет 0,125 км × 0,125 км, а общее количество ячеек — 161 865 (297 × 545).

### 3.2. Ограничения и объединение нескольких наборов данных.

#### Топографические особенности.

Геологические системы отличаются высокой сложностью, а топографические факторы влияют на перемещение и накопление элементов в осадочных породах. Поэтому для SR важно учитывать топографические факторы. Три топографических параметра — высота над уровнем моря, уклон и экспозиция — были получены на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) исследуемой территории в масштабе 1:50 000 (рис. 3).

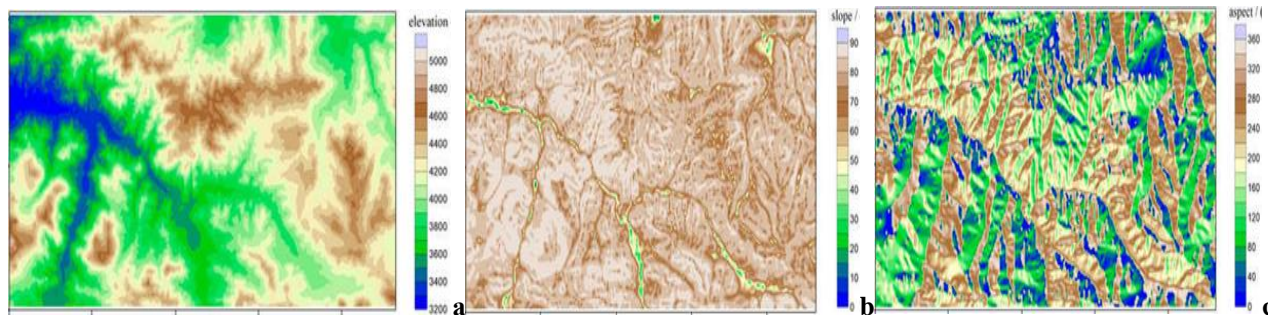


Рис. 3 Выделение топографических объектов: (а) высота, (б) уклон и (с) экспозиция.

Впоследствии эти параметры были интегрированы в обучающую модель. Уклон, определяемый как тангенс угла наклона, количественно характеризует крутизну поверхности. Аспект — это азимутальная ориентация склона, указывающая направление понижения рельефа. Вместо того чтобы рассматривать участки как изолированные точки, при расчёте уклона и аспекта учитываются пространственные зависимости, то есть рассматриваются как участки отбора проб, так и прилегающие к ним территории.

#### Встраивание геологической карты.

Русловые отложения представляют собой комплексные продукты выветривания коренных пород в пределах водосборных бассейнов, образовавшиеся в результате сочетания процессов физической эрозии и химического растворения. Литология коренных пород является основным фактором, определяющим состав русловых отложений. Однако эта взаимосвязь опосредована сложной динамикой переноса, которая не позволяет использовать простые линейные корреляции. Чтобы учесть эти геологические факторы, используются геологические карты, на которых систематически отображается распределение коренных пород. С помощью методов векторного встраивания эти геологические качественные представления преобразуются в числовые, которые можно использовать для компьютерного анализа. Полученные векторизованные геологические ограничения обеспечивают надёжную основу для (1) изучения закономерностей распределения элементов в различных геологических формациях и (2) значительного повышения пространственного разрешения геохимических карт с помощью передовых алгоритмов SR.

Процесс семантической векторизации геологической карты состоит из пяти ключевых этапов, направленных на преобразование геологических карт в формат, подходящий для последующего анализа:

(1) *Создание сетки на геологической карте.* Геологическая карта была разделена на ячейки размером  $0,125 \times 0,125$  км<sup>2</sup>, а общее количество ячеек составило 161 865 ( $297 \times 545$ ). Такая схема сетки позволяет точно сопоставлять данные с геохимическими картами.

(2) *Геологическая аннотация:* было выделено 13 различных литологических типов путём классификации каждой ячейки на основе нижележащей геологической формации. (рис. 1).

(3) *Создание текстового корпуса:* геологические отчёты и литература были собраны в специализированный корпус. Вложения для геологических терминов были созданы с использованием архитектуры Skip-gram в Word2Vec, настроенной со следующими параметрами: пятимерные векторы, минимальное пороговое значение частоты термина — один, размер контекстного окна — пять слов, пять итераций обучения. С помощью этого метода каждая геологическая единица была сопоставлена с 5-мерным векторным пространством, что позволило успешно закодировать семантические связи между терминами для дальнейшего анализа.

(4) *Встраивание геологической карты:* интеграция обученных векторов слов, обозначающих геологические единицы, с пространственным делением на единицы. Были созданы векторизованные представления для каждой ячейки.

(5) *Интеграция данных:* векторизованные геологические карты были пространственно сопоставлены с геохимическими и топографическими картами для ограничения SR.

### ***3.3. Разделение данных.***

Чтобы обеспечить надёжность модели и её способность к обобщению, набор данных был разделён на части и дополнен с учётом пространственного распределения и геологической однородности, как описано ниже:

#### Пространственное разделение.

На основе литологических единиц и распределения геохимических аномалий исследуемая территория была разделена на шесть субрегионов (обозначенных буквами А-F на [рисунке 2](#)). Такая стратегия разделения гарантирует, что в каждом субрегионе будут представлены типичные литологические типы (например, группа Цзиньшуйкоу, триасовый гранит), а также снижает влияние неоднородности геологического строения.

#### Генерация выборки.

Образцы были сгенерированы с помощью метода скользящего окна на основе предварительно обработанных данных с привязкой к сетке (размер ячейки  $0,125$  км $\times$  $0,125$  км).

Размер окна составлял  $32 \times 32$  пикселя, чтобы соответствовать входным размерам усовершенствованной модели U-Net, а шаг составлял 1 пиксель, чтобы максимально эффективно использовать пространственную информацию. Обучающая и тестовая выборки были случайным образом разделены в соотношении 4:1.

Каждая пара образцов состоит из:

- *Исходный слой*: 18 каналов, включающих десять геохимических карт масштаба 1:50 000 (As, Sb, Bi, Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Sn, Mo), три топографических объекта (высота над уровнем моря, уклон, экспозиция) и пять векторизованных геологических карт.

- *Выходной слой*: остаточные карты, представляющие собой разницу между геохимическими картами масштаба 1:25 000 и 1:50 000 для всех десяти элементов.

#### Увеличение объёма данных

Для уменьшения переобучения и улучшения обобщения к обучающей выборке применялись следующие стратегии аугментации (рис. 4).

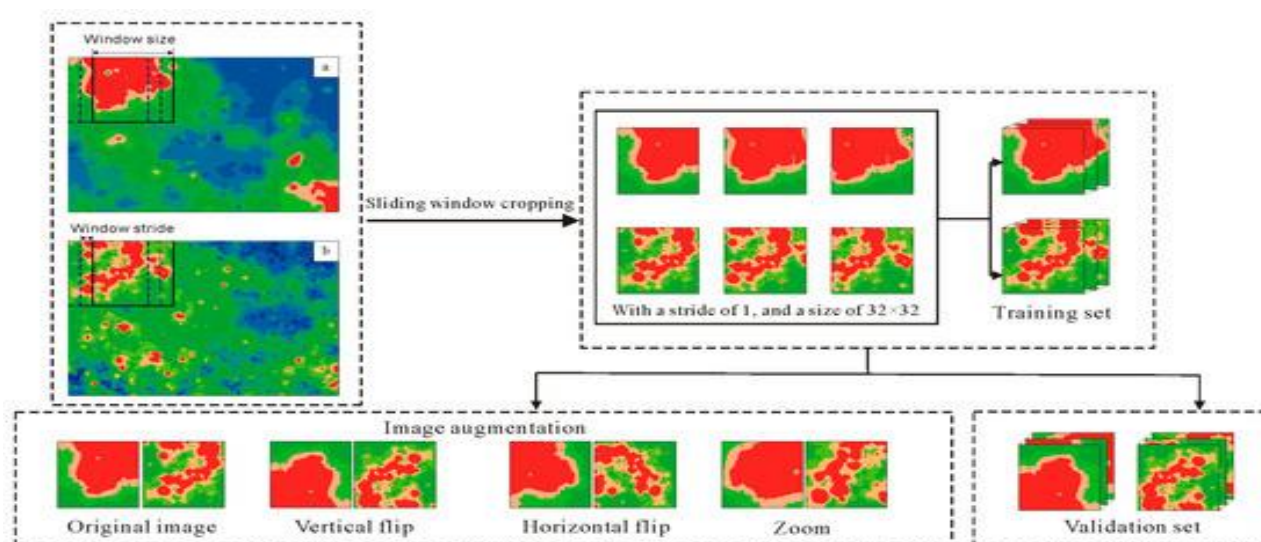


Рис. 4. Создание набора данных: (а) геохимические карты в масштабе 1:50 000; (б) в масштабе 1:25 000.

Для устранения направленности в пространственных паттернах применялось случайное горизонтальное и вертикальное переворачивание (с вероятностью 50%). Для имитации различий в плотности выборки и пространственном разрешении применялось случайное масштабирование (на 80–120 % от исходного размера).

#### **3.4. Многоуровневая U-образная сеть.**

Добавив в архитектуру U-Net больше слоёв и остаточные связи для повышения производительности сети, создали многоуровневый вариант U-Net. Для нормализации признаков перед первым свёрточным слоем применялась пакетная нормализация (BN). Остаточные блоки, нейронная архитектура, функция активации, функция потерь и метрики оценки подробно описаны в этом разделе.



для выравнивания размеров каналов по мере увеличения глубины сети. На четырёх этапах кодирования используются 64, 128, 256 и 512 каналов соответственно.

(2) Модуль «узкого места» соединяет кодер и декодер (рис. 6b). Он включает в себя две свертки (каждая с ReLU) и деконволюцию. Деконволюция интегрирована в соединение по принципу «пропуск».

(3) Декодер включает в себя четыре модуля повышения частоты дискретизации, аналогичные модулям кодера. Каждый модуль повышения частоты дискретизации содержит две свертки (каждая с ReLU) и одну деконволюцию, как показано на рис. 6c. К соединению по принципу «пропуск» применяется свертка.

(4) Свёртка корректирует размеры каналов перед окончательным выводом. Последний слой регрессии восстанавливает геохимические карты. Эта архитектура сохраняет признаки, извлечённые кодировщиком, и постепенно увеличивает пространственную информацию, обеспечивая эффективное многомасштабное объединение признаков.

Вне основной сети вводится отдельная секция ветвления, состоящая из двух модулей повышения дискретизации, каждый из которых содержит деконволюцию, слой исключения, свёртку и два слоя Swish (рис. 7).

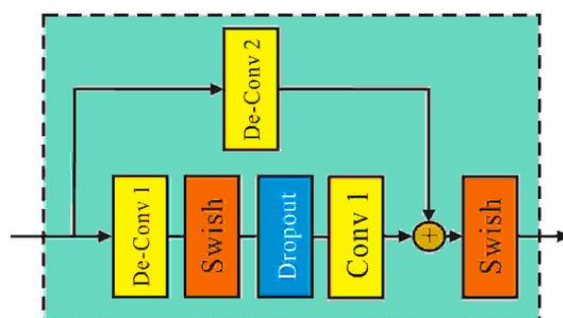


Рис. 7 Остаточный блок, используемый в разветвлённой сети.

Для повышения производительности в каждое соединение пропуска каждого модуля включена деконволюция. Соединения пропуска связывают модули ветвления с соответствующими слоями в первых двух модулях понижающей дискретизации основной сети (см. рис. 5). Такая конфигурация позволяет создать двухуровневую архитектуру U-Net. Эта структура улучшает возможности модели по обучению и обеспечивает более полное представление признаков за счёт добавления дополнительных повышающих, понижающих и пропускающих соединений. В таблице 1 указаны параметры каждого этапа и размер выходных данных.

Сетевая структура усовершенствованной U-образной сети.

|                          | Unit Level | Conv Layer       | Filter            | Stride                    | Output Size               |
|--------------------------|------------|------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| Input                    |            | Batchnorm        |                   |                           | $32 \times 32 \times 18$  |
| Downsampling module      | Level 1    | Conv 1           | $3 \times 3/64$   | 1                         | $32 \times 32 \times 64$  |
|                          |            | Conv 2           | $3 \times 3/64$   | 1                         | $32 \times 32 \times 64$  |
|                          |            | Conv 3           | $1 \times 1/64$   | 1                         | $32 \times 32 \times 64$  |
|                          | Level 2    | Conv 1           | $1 \times 1/128$  | 2                         | $16 \times 16 \times 128$ |
|                          |            | Conv 2           | $3 \times 3/128$  | 1                         | $16 \times 16 \times 128$ |
|                          |            | Conv 3           | $1 \times 1/128$  | 2                         | $16 \times 16 \times 128$ |
|                          | Level 3    | Conv 1           | $1 \times 1/256$  | 2                         | $8 \times 8 \times 256$   |
|                          |            | Conv 2           | $3 \times 3/256$  | 1                         | $8 \times 8 \times 256$   |
|                          |            | Conv 3           | $1 \times 1/256$  | 2                         | $8 \times 8 \times 256$   |
|                          | Level 4    | Conv 1           | $1 \times 1/512$  | 2                         | $4 \times 4 \times 512$   |
|                          |            | Conv 2           | $3 \times 3/512$  | 1                         | $4 \times 4 \times 512$   |
|                          |            | Conv 3           | $1 \times 1/512$  | 2                         | $4 \times 4 \times 512$   |
| Bottleneck module        | Level 5    | Conv 1           | $1 \times 1/1024$ | 2                         | $2 \times 2 \times 1024$  |
|                          |            | Conv 2           | $3 \times 3/1024$ | 1                         | $2 \times 2 \times 1024$  |
|                          |            | De-Conv 1        | $2 \times 2/512$  | 2                         | $4 \times 4 \times 512$   |
|                          |            | Conv 3           | $1 \times 1/512$  | 1                         | $4 \times 4 \times 512$   |
| Upsampling module        | Level 6    | Conv 1           | $3 \times 3/512$  | 1                         | $4 \times 4 \times 512$   |
|                          |            | Conv 2           | $3 \times 3/512$  | 1                         | $4 \times 4 \times 512$   |
|                          |            | De-Conv 1        | $2 \times 2/256$  | 2                         | $8 \times 8 \times 256$   |
|                          |            | De-Conv 2        | $1 \times 1/256$  | 2                         | $8 \times 8 \times 256$   |
|                          | Level 7    | Conv 1           | $3 \times 3/256$  | 1                         | $8 \times 8 \times 256$   |
|                          |            | Conv 2           | $3 \times 3/256$  | 1                         | $8 \times 8 \times 256$   |
|                          |            | De-Conv 1        | $2 \times 2/128$  | 2                         | $16 \times 16 \times 128$ |
|                          |            | De-Conv 2        | $1 \times 1/128$  | 2                         | $16 \times 16 \times 128$ |
| Level 8                  | Conv 1     | $3 \times 3/128$ | 1                 | $16 \times 16 \times 128$ |                           |
|                          | Conv 2     | $3 \times 3/128$ | 1                 | $16 \times 16 \times 128$ |                           |
|                          | De-Conv 1  | $2 \times 2/64$  | 2                 | $32 \times 32 \times 64$  |                           |
|                          | De-Conv 2  | $1 \times 1/64$  | 2                 | $32 \times 32 \times 64$  |                           |
| Level 9                  | Conv 1     | $3 \times 3/64$  | 1                 | $32 \times 32 \times 64$  |                           |
|                          | Conv 2     | $3 \times 3/64$  | 1                 | $32 \times 32 \times 64$  |                           |
| Branch Upsampling module | Level 10   | De-Conv 1        | $2 \times 2/64$   | 2                         | $32 \times 32 \times 64$  |
|                          |            | Conv 1           | $1 \times 1/64$   | 1                         | $32 \times 32 \times 64$  |
|                          |            | De-Conv 2        | $1 \times 1/64$   | 2                         | $32 \times 32 \times 64$  |
|                          | Level 11   | De-Conv 1        | $2 \times 2/32$   | 1                         | $32 \times 32 \times 32$  |
| Conv 1                   |            | $3 \times 3/32$  | 1                 | $32 \times 32 \times 32$  |                           |
| Level 11                 | De-Conv 2  | $1 \times 1/32$  | 1                 | $32 \times 32 \times 32$  |                           |
|                          | Conv 1     | $3 \times 3/32$  | 1                 | $32 \times 32 \times 32$  |                           |
| Output                   |            | Conv 1           | $3 \times 3$      | 1                         | $32 \times 32 \times 10$  |

Функция активации.

Функции активации вводят нелинейные зависимости между входными и выходными данными, позволяя сетям обучаться сложным представлениям. Функция ReLU, используемая как в стандартных архитектурах U-Net, так и в большинстве их вариантов, эффективно решает проблему исчезающего градиента. По сравнению с ReLU и другими функциями активации, Swish — это нелинейная, плавная и не достигающая насыщения функция активации, которая может повысить производительность некоторых моделей. Была использована Swish в ответвлённой сети. Формула Swish выглядит так:

$$f(x) = \frac{x}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

здесь  $x$  обозначает выходные данные нейрона из предыдущего слоя, а  $f(x)$  — выходные данные функции активации.

### Функция потерь.

Нейронная сеть оптимизирует свои весовые параметры в соответствии с функцией потерь. К распространённым функциям потерь относятся BCELoss, DiceLoss и IoULoss. Для задач регрессии с непрерывными выходными данными использовали функцию потерь L2 для оптимизации производительности, которая определяется следующим образом:

$$loss = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (2)$$

где  $n$  — количество выборок,  $x_i$  — входные данные, а  $y_i$  — выходные данные.

В задаче регрессии обучение сети заключается в минимизации функции потерь.

### Показатели оценки.

В настоящее время не существует общепринятых показателей оценки для определения SR геохимических карт. Для анализа эффекта реконструкции используются два объективных показателя оценки: пиковое отношение сигнал/шум (PSNR) и индекс структурного сходства (SSIM). PSNR определяется максимально возможным значением пикселя ( $L$ ) и среднеквадратичной ошибкой (MSE) между исходным и реконструированным изображениями. Для исходного и реконструированного изображений PSNR рассчитывается следующим образом:

$$PSNR = 10 \cdot \lg \left( \frac{L^2}{MSE} \right) \quad (3)$$

О более высоком качестве реконструкции свидетельствуют более высокие значения PSNR, которые показывают, что между исходным и восстановленным изображениями меньше различий на уровне пикселей. SSIM количественно оценивает сходство изображений, сравнивая яркость, контрастность и структурные особенности. SSIM оценивает качество изображения с точки зрения восприятия. Формула представлена ниже:

$$C_l(U, V) = \frac{2\mu_U\mu_V + C_1}{\mu_U^2 + \mu_V^2 + C_1} \quad (4)$$

$$C_c(U, V) = \frac{2\mu_U\mu_V + C_2}{\mu_U^2 + \mu_V^2 + C_2} \quad (5)$$

$$C_s(U, V) = \frac{\sigma_{UV} + C_3}{\sigma_U\sigma_V + C_3} \quad (6)$$

$$SSIM(U, V) = C_l(U, V) \times C_c(U, V) \times C_s(U, V) \quad (7)$$

здесь  $C_l$ ,  $C_c$  и  $C_s$  обозначают яркость, контрастность и структурное сходство соответственно.  $\mu_U$  и  $\mu_V$  обозначают среднюю интенсивность пикселей в сравниваемых изображениях.  $\sigma_U$  и  $\sigma_V$  обозначают их стандартные отклонения.  $\sigma_{UV}$  измеряет ковариацию между ними.  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  — константы.

SSIM количественно определяет структурное сходство со значениями, ограниченными [0, 1]. Значения, близкие к 1, указывают на превосходную точность реконструкции.

### 3.5. Рабочий процесс.

1. К геохимическим данным LR применяется логарифмическое преобразование для сглаживания неравномерного распределения и приближения к нормальному распределению.

2. Данные, преобразованные в логарифмическую шкалу, интерполируются для создания геохимических карт. Эти карты, а также карты высот, уклонов, экспозиций и встроенные геологические карты с соответствующим пространственным разрешением служат входными слоями для модели.

3. Остаточные геохимические карты ( $R_{ij}$ ) рассчитываются как разница между геохимическими картами HR ( $H_{ij}$ ) и геохимическими картами LR ( $L_{ij}$ ). Эти остаточные значения служат выходным сигналом модели, позволяющим изучать мелкомасштабную информацию в различных разрешениях. Расчёт выполняется следующим образом:

$$R_{ij} = H_{ij} - L_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

геохимическая карта представлена в виде матрицы  $m \times n$ , где  $m$  — количество строк, а  $n$  — количество столбцов.

4. К входным слоям применяется нормализация по минимуму и максимуму для стандартизации диапазона данных и устранения расхождений в масштабе.

5. Входные и выходные слои обрезаются до областей А–F (рис. 2). Используется метод скользящего окна с размером окна  $32 \times 32$  пикселя и шагом 1. Затем набор данных случайным образом делится на обучающую и тестовую выборки в соотношении 4:1.

6. Обучающая выборка используется для обучения модели, а тестовая — для оценки её эффективности. Для повышения надёжности модели применялось увеличение объёма данных, в том числе случайное горизонтальное/вертикальное переворачивание и масштабирование образцов из регионов А–F.

7. Обученная модель прогнозирует данные по всей исследуемой территории, создавая остаточную геохимическую карту.

8. Остаточная геохимическая карта объединяется с картой LR с помощью обратного преобразования для восстановления геохимических карт HR.

#### 4. Результаты и обсуждение.

##### 4.1. Два набора данных для геохимического картирования плотности.

Статистические результаты анализа образцов литологических единиц из многомасштабных наборов данных (Core Area на масштабе 1:25 000; Core Area на масштабе 1:50 000; Entire Area на масштабе 1:50 000). Эти результаты раскрывают ключевые характеристики распределения образцов на исследуемой территории и служат важным подспорьем для расчёта региональных фоновых значений и интерпретации геохимических данных (табл. 2).

Табл. 2

**Распределение образцов по литологическим единицам в керне  
и на всей исследуемой территории**

| Lithological Unit                       | Core Area (1:25,000) |         | Core Area (1:50,000) |         | Entire Area (1:50,000) |         |
|---|----------------------|---------|----------------------|---------|------------------------|---------|
|   | Number               | %       | Number               | %       | Number                 | %       |
| Cenozoic sediments                      | 808                  | 3.58%   | 438                  | 7.29%   | 1058                   | 8.31%   |
| Triassic Elashan Formation              | *                    | *       | *                    | *       | 266                    | 2.09%   |
| Triassic Hongshuichuan Formation        | *                    | *       | *                    | *       | 120                    | 0.94%   |
| Carboniferous Haotelowa Formation       | *                    | *       | *                    | *       | 51                     | 0.40%   |
| Carboniferous Halagole Formation        | *                    | *       | *                    | *       | 173                    | 1.36%   |
| Xiaomiao Formation in Changcheng System | 737                  | 3.27%   | 230                  | 3.83%   | 1016                   | 7.98%   |
| Paleoproterozoic Jinshuikou Group       | 6083                 | 26.99%  | 1565                 | 26.04%  | 3050                   | 23.95%  |
| Triassic granite                        | 2095                 | 9.29%   | 620                  | 10.31%  | 1385                   | 10.88%  |
| Triassic granodiorite                   | 7935                 | 35.20%  | 1949                 | 32.42%  | 3675                   | 28.86%  |
| Permian quartz diorite                  | 176                  | 0.78%   | 34                   | 0.57%   | 92                     | 0.72%   |
| Carboniferous granodiorite              | 1813                 | 8.04%   | 446                  | 7.42%   | 733                    | 5.76%   |
| Silurian granodiorite                   | 283                  | 1.26%   | 78                   | 1.30%   | 200                    | 1.57%   |
| Ordovician tonalite                     | 2612                 | 11.59%  | 651                  | 10.83%  | 914                    | 7.18%   |
| Total                                   | 22,542               | 100.00% | 6011                 | 100.00% | 12,734                 | 100.00% |

Note: \* Not exposed or no samples collected.

Результаты показывают, что триасовый гранодиорит и палеопротерозойская группа Цзиньшуйкоу являются доминирующими литологическими единицами во всех наборах данных. Эти две литологии широко распространены на исследуемой территории, и для них было собрано достаточное количество образцов, что позволяет адекватно представить общие характеристики регионального геологического фона. Напротив, пермский кварцевый диорит и каменноугольная формация Хаотелова представлены значительно хуже, что приводит к высокой дисперсии геохимических данных и, как следствие, к менее надёжным фоновым значениям.

Средние концентрации десяти элементов (As, Sb, Bi, Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Sn и Mo) в донных отложениях ручьёв в районе Гули послужили основой для определения местных значений содержания элементов, которые были сопоставлены с региональными фоновыми значениями в провинции Цинхай и регионе Восточный Куньлунь (табл. 3).

**Сравнение статистических характеристик отдельных элементов,  
в результате геохимических исследований.**

| Element | Min   |          |       | Max     |          |        | X     |          |       | Md    |          |       | QP    | EK   |
|---------|-------|----------|-------|---------|----------|--------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|------|
|         | CR    | 1:50,000 | ER    | CR      | 1:50,000 | ER     | CR    | 1:50,000 | ER    | CR    | 1:50,000 | ER    |       |      |
| As      | 0.01  | 0.04     | 0.04  | 806.45  | 292.10   | 379.78 | 8.78  | 7.78     | 9.44  | 6.08  | 6.11     | 6.54  | 13.6  | 12.3 |
| Sb      | 0.01  | 0.01     | 0.01  | 40.12   | 21.70    | 44.10  | 0.53  | 0.57     | 0.71  | 0.36  | 0.39     | 0.45  | 0.93  | 0.96 |
| Bi      | 0.01  | 0.01     | 0.01  | 100     | 21.79    | 28.49  | 0.37  | 0.29     | 0.31  | 0.20  | 0.20     | 0.20  | 0.29  | 0.33 |
| Au *    | 0.03  | 0.50     | 0.50  | 1212.5  | 149.30   | 390.79 | 1.35  | 1.66     | 1.30  | 0.89  | 1.30     | 1.81  | 1.35  | 1.61 |
| Ag *    | 10.00 | 5.20     | 5.20  | 5000    | 1681.00  | 5000   | 87.98 | 63.41    | 68.10 | 65.00 | 49.00    | 46.80 | 65.0  | 51.0 |
| Cu      | 0.50  | 1.32     | 1.32  | 3000    | 608.00   | 947.27 | 22.92 | 17.68    | 19.84 | 18.60 | 15.54    | 16.30 | 19.9  | 20.2 |
| Pb      | 0.36  | 2.63     | 2.63  | 3411.82 | 664.00   | 1250   | 23.35 | 17.46    | 20.81 | 20.90 | 15.60    | 16.65 | 19.97 | 18.7 |
| Zn      | 1.18  | 14.83    | 14.83 | 2638.82 | 460.00   | 779.66 | 59.95 | 47.03    | 52.21 | 55.30 | 44.10    | 46.73 | 57.5  | 58.3 |
| Sn      | 0.10  | 0.37     | 0.37  | 100     | 32.35    | 41.12  | 2.56  | 2.22     | 2.20  | 2.27  | 2.00     | 1.70  | 2.61  | 2.36 |
| Mo      | 0.01  | 0.07     | 0.07  | 237.10  | 39.61    | 39.61  | 1.25  | 1.13     | 1.21  | 0.98  | 0.96     | 1.02  | 0.64  | 0.80 |

Min-minimum; Max-maximum; X-mean; Md-median; CR-core area; ER-entire area; QP-elemental abundances in stream sediments of Qinghai Province; EK-elemental abundances in stream sediments of East Kunlun; \* unit in  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , the others in  $\text{mg}/\text{kg}$ .

Результаты показывают, что при масштабе картографирования 1:25 000 содержание семи элементов (Bi, Ag, Cu, Pb, Zn, Sn и Mo) превышает фоновые значения в провинции Цинхай. В масштабе 1:50 000 только три элемента (Ag, Pb и Mo) встречаются в количествах, превышающих фоновые значения как в провинции Цинхай, так и в регионе Восточный Куньлунь. В пределах основной картографической области содержание элементов, полученное в масштабе 1:25 000, выше, чем в масштабе 1:50 000, для всех элементов, кроме сурьмы и золота. Это указывает на то, что в центральной части м-ния такие элементы, как Bi, Ag, Cu, Pb, Zn, Sn и Mo, характеризуются повышенным фоновым содержанием, которое значительно превышает средний показатель по провинции. Следовательно, исследуемая территория, особенно центральная часть м-ния, обладает большим потенциалом для обогащения элементами и минерализации.

Анализ данных в таблице 3 показывает значительные различия в фоновых значениях содержания серебра в донных отложениях, собранных с разной частотой. Наблюдаемые различия можно объяснить двумя основными факторами.

Во-первых, это распределение геологических тел с высоким содержанием в пределах основной территории. В пределах основной территории геохимического картирования масштаба 1:25 000 широко распространены группа Цзиньшуйкоу, триасовый гранодиорит и формация Сяомяо. Эти литологические единицы характеризуются значительно более высокими фоновыми концентрациями серебра в донных отложениях по сравнению со средним показателем по региону. Концентрированное распределение этих литологических единиц с высоким содержанием серебра напрямую влияет на общее содержание серебра в районе исследования с масштабом 1:25 000.

Во-вторых, различия в плотности отбора проб и пространственном охвате. При геохимическом исследовании в масштабе 1:25 000 плотность отбора проб была в четыре раза выше, чем при исследовании в масштабе 1:50 000, при этом основное внимание уделялось

участкам с высоким содержанием серебра. В отличие от этого, исследование в масштабе 1:50 000 охватывало более обширную территорию, включая обширные участки с низким содержанием серебра, такие как неминерализованные осадочные породы. Добавление образцов с низким содержанием серебра разбавляет общее количество серебра, а различия в стратегиях отбора проб между двумя шкалами ещё больше усиливают разницу в концентрации между участками отбора проб.

Анализ рисунка 8 показывает, что концентрации элементов в пределах основной области геохимического картирования статистически значительно различаются в зависимости от масштаба, что обусловлено совокупным влиянием пространственной неоднородности элементов и различий в масштабе выборки.

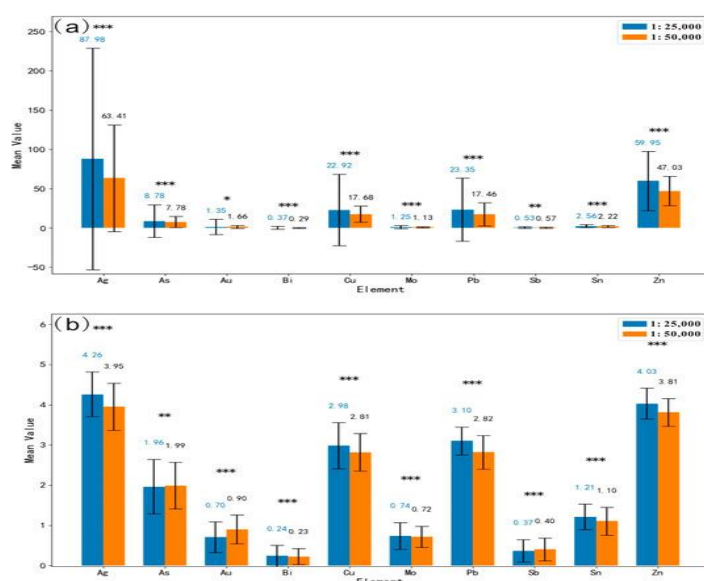


Рис. 8 Анализ дисперсионного графика содержания элементов в геохимических данных в разных масштабах: **a** - исходные данные; **b** - данные, преобразованные в логарифмическую шкалу.

Эти различия обусловлены совокупным влиянием присущих элементам пространственных характеристик распределения и различий в масштабе выборки. На карте масштаба 1:25 000 показаны более широкие диапазоны концентраций с более низкими минимумами и более высокими максимумами. Это отражает естественную геохимическую неоднородность: увеличение плотности выборки повышает дисперсию данных и позволяет лучше различать пространственные вариации. Этот принцип лежит в основе стратегий выборки с высокой плотностью для обнаружения минерализованных зон. Распределение геохимических элементов, обусловленное процессами минерализации и изменения, характеризуется значительной пространственной неоднородностью. Крупномасштабная выборка (1:25 000) позволяет получить более локализованные высокие значения, в то время как среднемасштабная выборка (1:50 000) лучше отражает региональные фоновые условия, что приводит к

значительным различиям между их средними значениями. Значительные различия в концентрации элементов между масштабами, подтверждённые дисперсионным анализом, наглядно демонстрируют, как пространственное разрешение влияет на возможность обнаружения аномалий, а не указывают на проблемы с качеством данных или случайные ошибки.

Кроме того, исходный набор данных характеризуется значительной дисперсией и наличием выбросов. Эти выбросы могут негативно влиять на модели глубокого обучения, внося искажения в процесс обучения и тем самым снижая их способность к изучению закономерностей в обычных данных и точность прогнозирования на основе новых данных. Поэтому на этапе ввода данных в модель мы применили логарифмическое преобразование. Это преобразование в некоторой степени снижает влияние выбросов (рис. 8b). Такой подход позволяет модели во время обучения более эффективно фокусироваться на фундаментальных закономерностях данных и общих тенденциях, что способствует разработке более надёжных моделей, которые лучше отражают взаимосвязи между данными.

#### 4.2. Геохимические закономерности при разной плотности отбора проб.

В ходе исследования были составлены геохимические карты для десяти элементов с разной плотностью отбора проб. На рисунке 9 представлены геохимические карты для Ag, Cu, Zn и Ni.

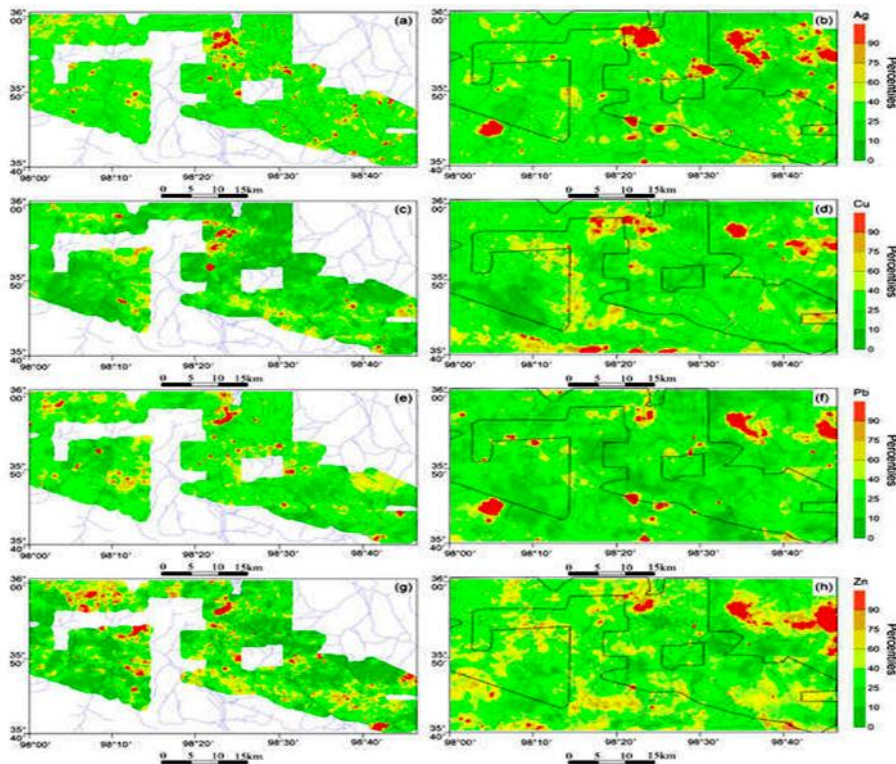


Рис. 9 (а–h) Сравнение геохимических карт с разной плотностью отбора проб. В первом столбце - геохимические карты м-ба 1:25 000, а во втором — 1:50 000 (черные рамки - основная область геохимического картирования в м-бе 1:25 000).

Эти карты демонстрируют схожие геохимические закономерности при разной плотности отбора проб, что согласуется с более ранними исследованиями, проведёнными в различных ландшафтах, таких как равнины, холмы, саванны и пустыня Гоби. Как видно картографирование с низкой плотностью даёт стабильные и отслеживаемые геохимические закономерности, в то время как картографирование с высокой плотностью позволяет выявить геохимические аномалии с большей точностью и детализацией. Таким образом, использование геохимических карт с высокой плотностью в качестве ограничений для повышения разрешения карт с низкой плотностью представляет собой быстрый и экономичный подход, который может помочь при поисках и снизить риски.

#### 4.3. Результаты внедрения геологической карты.

В соответствии с процессом семантической векторизации, описанным в разделе «Методы», геологическая информация была успешно преобразована в количественные представления. Результаты векторного кодирования геологических терминов (табл. 4) обеспечивают семантическую основу для последующей векторизации пространственных единиц, а полученное в результате векторизованное представление ячеек сетки (рис. 10) демонстрирует пространственное распределение геологических объектов.

Табл. 4.

Семантические векторы геологических объектов.

| Geological Entities                     | Word Vector Dimensions |         |        |         |         |
|---|------------------------|---------|--------|---------|---------|
|   | 1                      | 2       | 3      | 4       | 5       |
| Cenozoic sediments                      | 1.3197                 | 0.9635  | 2.9743 | -1.2355 | -0.1188 |
| Triassic Elashan Formation              | 0.0934                 | -0.1082 | 3.3596 | -0.9471 | -1.0408 |
| Triassic Hongshuichuan Formation        | 1.3764                 | 0.2599  | 2.8317 | -0.9789 | -1.6656 |
| Carboniferous Haotelowa Formation       | 1.2579                 | 0.5388  | 3.1968 | -1.3147 | -1.3434 |
| Carboniferous Halagole Formation        | 0.8648                 | 0.1356  | 3.2156 | -1.1133 | -1.0306 |
| Xiaomiao Formation in Changcheng System | 0.8192                 | 0.3687  | 2.3485 | -0.8228 | -0.5159 |
| Paleoproterozoic Jinshuikou Group       | 0.6219                 | 0.3079  | 3.6535 | -1.3698 | -1.3064 |
| Triassic granite                        | -0.0008                | 0.0892  | 2.5573 | -0.7160 | -1.3924 |
| Triassic granodiorite                   | 0.2546                 | 0.4263  | 3.4675 | -1.3776 | -1.1784 |
| Permian quartz diorite                  | 0.3586                 | -0.2829 | 2.5137 | -0.3464 | -1.8281 |
| Carboniferous granodiorite              | 0.6695                 | 0.0571  | 2.3866 | -0.5355 | -1.9742 |
| Silurian granodiorite                   | 0.1830                 | 0.3001  | 2.3072 | -0.7561 | -0.6536 |
| Ordovician tonalite                     | 0.4988                 | 0.1736  | 1.8549 | -0.4664 | -0.8848 |

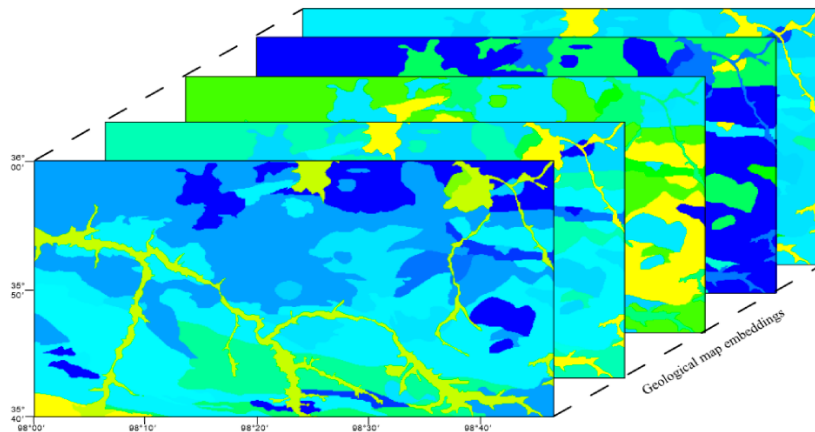


Рис. 10 Результаты встраивания геологической карты.

На этапе встраивания геологических терминов 5-мерные векторы, созданные с помощью модели Word2Vec, не только упрощают численное представление геологических объектов, но и точно кодируют семантические связи между терминами с помощью векторных пространственных отношений. На основе векторных данных из таблицы 4 косинусное сходство между триасовым гранитом и триасовым гранодиоритом — обеими кислыми интрузивными породами — достигает 0,92, что тесно связано с их общим геологическим происхождением как продуктов магматической интрузии. Между тем векторное сходство в 0,89 между триасовым гранодиоритом и каменноугольным гранодиоритом — схожими по литологии, но относящимися к разным периодам — точно отражает их генетическое родство, обусловленное контагиозным магматизмом, несмотря на временную разницу.

Дальнейший анализ показывает, что векторное сходство между палеопротерозойской группой Цзиньшуйкоу и каменноугольной формацией Халаголе составляет 0,98, что отражает их пространственное наложение как регионального метаморфического фундамента вышележащих осадочных пластов. А сходство между силурийским гранодиоритом и ордовикским тоналитом составляет 0,97, что указывает на непрерывность магматической активности в раннем палеозое. Такое эффективное семантическое кодирование позволяет создать надёжную базовую векторную библиотеку для последующего количественного определения геологических характеристик в единицах сетки, что даёт возможность эффективно коррелировать геологические объекты разных периодов и происхождения с помощью числовых векторов.

#### **4.4. Эксперименты.**

Такой подход повысил разнообразие выборки и позволил сформировать окончательный набор данных, содержащий 376 541 пар образцов. Оптимальные гиперпараметры, использованные в эксперименте, приведены в таблице 5.

Табл. 5.

**Настройки гиперпараметров для обучения модели.**

| <b>Hyperparameters</b>            | <b>Value</b>                                     |
|-----------------------------------|--|
| Batch size                        | 32   |
| Initial learning rate             | 0.001  |
| Learning rate adjustment strategy | With a 50% reduction applied every 40 iterations |
| Epochs                            | 1000   |
| Optimizer                         | Adam   |
| Low resolution image size         | 32 × 32  |
| High resolution image size        | 32 × 32  |

После обучения функция потерь и среднеквадратичная ошибка (RMSE) предлагаемого метода на тестовом наборе показаны на рисунке 11.

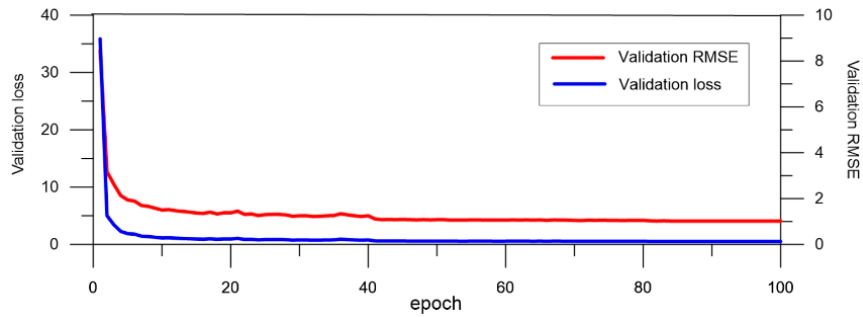


Рис. 11 Функция потерь и кривые RMSE для тестовой выборки.

По мере увеличения количества итераций значения как функции потерь, так и RMSE на тестовом наборе демонстрируют тенденцию к снижению, прежде чем в конечном итоге сойтись.

Чтобы оценить эффективность SR, сравнили наш метод с SRCNN, VDSR и U-Net. Количественное сравнение проводилось с использованием как средних, так и пиковых значений метрик PSNR и SSIM в области исследования, охватываемой обоими масштабами.

Как показано в таблице 6, метод обеспечивает самые высокие показатели PSNR и SSIM.

Табл. 6.

Показатели PSNR и SSIM для SRCNN, VDSR, U-net метода тестовой выборке.

| Network Structure   | Geochemical Maps | Topographic Feature Maps | Embedded Geological Maps | PSNR    |         | SSIM    |         |
|---------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                     |                  |                          |                          | Maximum | Average | Maximum | Average |
| SRCNN               | Yes              | Yes                      | Yes                      | 27.493  | 13.401  | 0.769   | 0.273   |
|                     | Yes              | Yes                      | No                       | 26.791  | 13.004  | 0.781   | 0.239   |
|                     | Yes              | No                       | No                       | 25.874  | 13.058  | 0.741   | 0.235   |
| VDSR                | Yes              | Yes                      | Yes                      | 35.199  | 20.678  | 0.933   | 0.623   |
|                     | Yes              | Yes                      | No                       | 30.017  | 16.518  | 0.849   | 0.419   |
|                     | Yes              | No                       | No                       | 30.081  | 16.167  | 0.831   | 0.407   |
| U-net               | Yes              | Yes                      | Yes                      | 36.070  | 22.043  | 0.945   | 0.714   |
|                     | Yes              | Yes                      | No                       | 36.967  | 22.759  | 0.946   | 0.708   |
|                     | Yes              | No                       | No                       | 36.333  | 20.101  | 0.919   | 0.642   |
| The proposed method | Yes              | Yes                      | Yes                      | 38.486  | 25.334  | 0.968   | 0.817   |
|                     | Yes              | Yes                      | No                       | 37.336  | 22.136  | 0.946   | 0.722   |
|                     | Yes              | No                       | No                       | 36.455  | 23.147  | 0.945   | 0.713   |

Остаточные блоки оптимизируют распространение признаков, а обучение с остаточным контролем использует остаточные геохимические карты в качестве целевых объектов для обучения, чтобы улучшить распознавание высокочастотных деталей. Все эти компоненты работают вместе, чтобы сохранить обучаемость сети и повысить точность реконструкции. По сравнению с другими методами эта сеть демонстрирует более эффективное извлечение многомасштабных признаков из геохимических карт, при этом точность пропорционально повышается за счёт дополнительных ограничений.

Перекрестные графики, сравнивающие изображения HR с восстановленными изображениями SR модели, вместе с их значениями  $R^2$  показаны на рисунке 12.

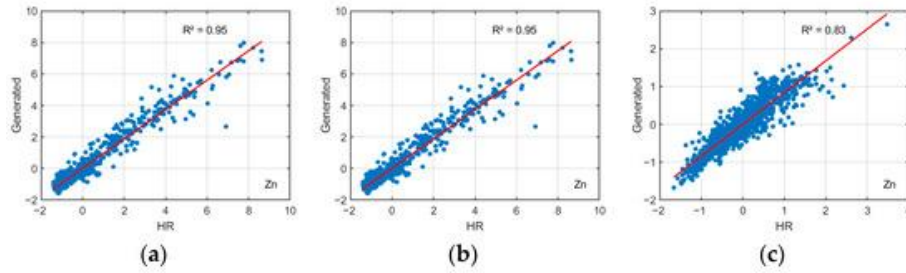


Рис. 12 Сравнение перекрестных диаграмм изображений HR и SR с помощью предложенного метода. (а–с) — изображения G, Н и I на рис. 2 соответственно.

Эти графики показывают сильную корреляцию между изображениями HR и SR в этих областях ( $R^2 > 0,8$ ).

#### 4.5. Реконструкция геохимической карты.

Обученная модель была применена для восстановления геохимических карт высокого разрешения по всей исследуемой территории. Как показано на рисунках 13-16 для Ag, Cu, Pb и Zn, восстановленные карты высокого разрешения демонстрируют более высокое разрешение по сравнению с картами низкого разрешения, что подтверждает применимость SR для геохимического картирования в районе Гули, провинция Цинхай.

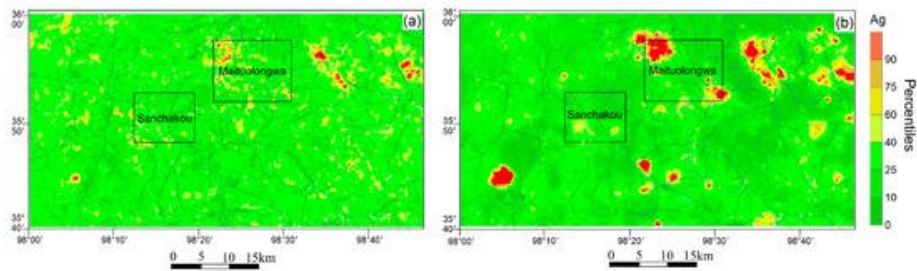


Рис. 13 Геохимические карты Ag: **a**- SR, **b**- LR.

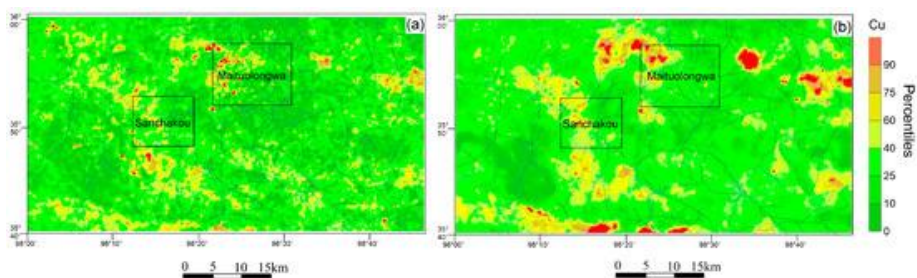


Рис. 14 Геохимические карты Cu: **a**- SR, **b**- LR.

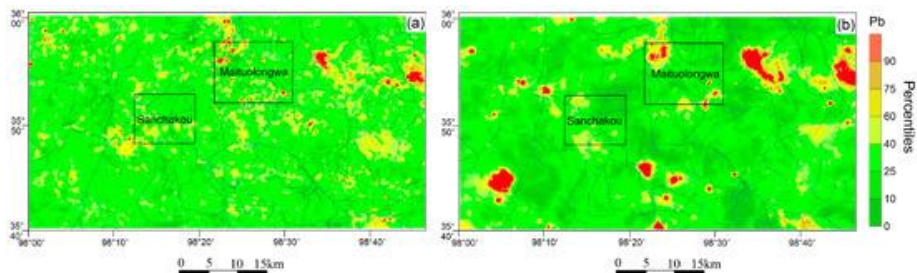


Рис. 15 Геохимические карты: **a**- Pb, **b**- Hb.

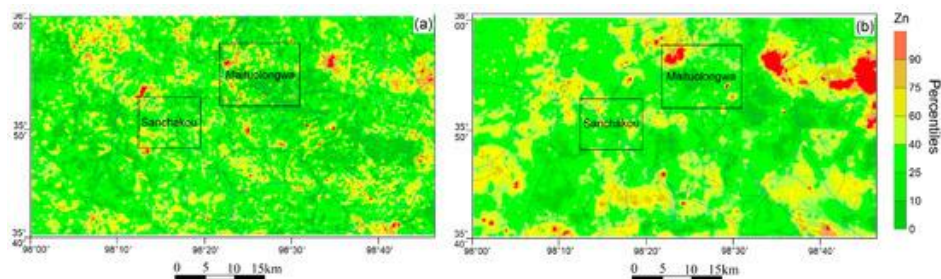


Рис. 16 Геохимические карты Zn: a- SR, b- LR.

Чтобы дополнительно подтвердить закономерности миграции элементов в донных отложениях и улучшить интерпретацию аномальных структур на реконструированных картах высокого разрешения, геохимические аномалии свинца были выделены на карте высокого разрешения с помощью универсального метода кригинга (рис. 17).

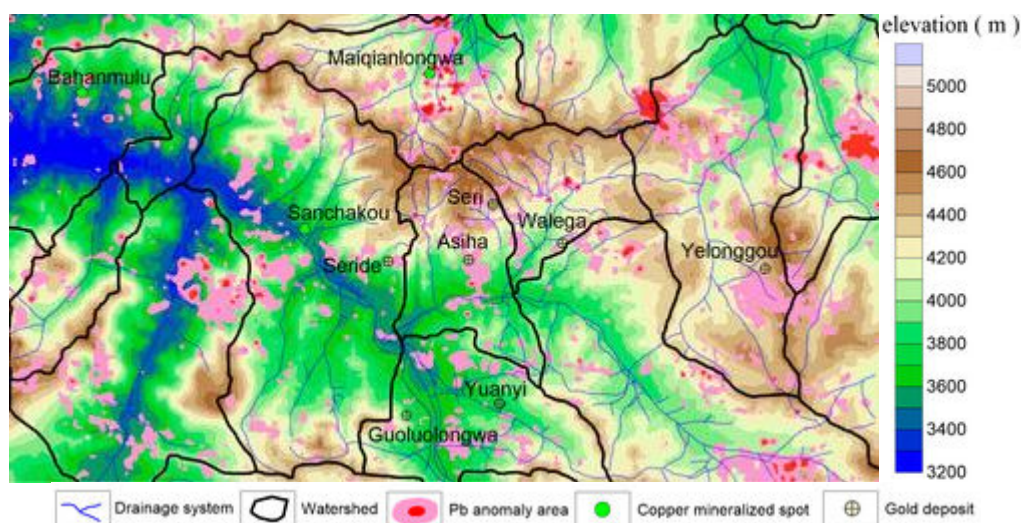


Рис. 17 Геохимические аномалии по свинцу, выявленные с помощью универсального кригинга. (розовые области - аномалии по свинцу, превышающие среднее значение  $+1\sigma$ , а красные — превышающие среднее значение  $+2\sigma$ ).

Рисунок 17 объединяет три ключевых слоя данных для уточнения особенностей распределения и доминирующих закономерностей Pb:

- расположение известных участков медной минерализации и месторождений золота, что позволяет выявить пространственную корреляцию между аномалиями Pb и минерализованными телами;
- основные дренажные системы и данные о высоте над уровнем моря, что позволяет визуализировать пути гидрологического переноса богатых Pb отложений;
- выделенные водосборные бассейны на основе данных о высоте над уровнем моря, что позволяет уточнить закономерности миграции элементов внутри бассейнов.

Этот многоуровневый анализ выявил несколько геологически значимых закономерностей.

Во-первых, вокруг известных участков минерализации (например, медного м-ния Майтуолунва и золотых месторождений Асиха, Сери, Йелонггоу и Валегга) обнаружены

скопления аномалий, связанных с содержанием свинца, что подтверждает неслучайное распределение свинца и его пространственную связь с минерализацией.

*Во-вторых*, аномалии содержания свинца, прилегающие к этим известным участкам, демонстрируют чёткую тенденцию к миграции вниз по склону от высокогорных районов к долинам, расположенным на более низких высотах, что отражает гидрологический перенос богатых свинцом отложений в пределах водосборных систем.

*В-третьих*, несмотря на то, что количество известных участков минерализации в исследуемой области ограничено, особенно это касается свинцово-цинковых месторождений, которые напрямую связаны с аномалиями содержания свинца, карты геохимических закономерностей тем не менее представляют значительную ценность для выявления потенциально богатых участков на основе этих аномалий. Это особенно важно в регионах с низкой интенсивностью геологических исследований.

Для детального анализа были выбраны две области (Майтуолунва и Саньчакоу) на рисунке 16. Сравнивая геохимические карты до и после реконструкции, выявляется взаимосвязь между характером распределения элементов и фоновыми значениями в коренных породах. В районе Майтуолунва обнажённые пласты в основном состоят из формации Сяомяо системы Чанчэн. К интрузивным породам относятся тоналит позднего ордовика, гранодиорит позднего триаса и гранит (рис. 18).

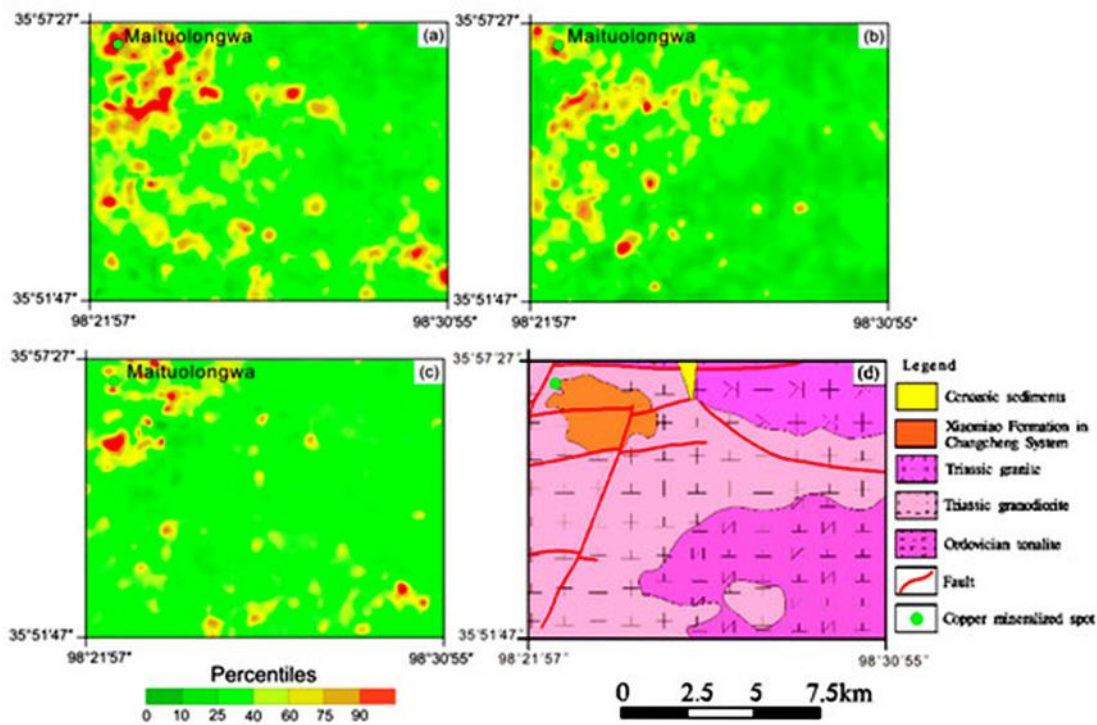


Рис. 18. Карта анализа восстановленных геохимических аномалий в масштабе 1:25 000 в районе Майтуолунва: (a) Ag, (b) Cu, (c) Pb, (d) геологическая карта.

Эти интрузивные породы имеют интрузивные контакты с формацией Сяомяо. В этом районе хорошо развиты разломные структуры, преимущественно простирающиеся с востока на запад и с северо-востока на юго-запад. В этом районе наблюдается хорошее пространственное совпадение геохимических аномалий с многочисленными центрами концентрации, для которых характерны ассоциации элементов Ag-Cu-Pb. Наиболее перспективным объектом для поисков в этом районе является минерализация скарнового типа. Полевые исследования выявили зону вкрапленных руд на участке минерализации Майтуолунва на северо-западе исследуемой территории, расположенную на контакте между поздне триасовым гранодиоритом и формацией Сяомяо. В этой зоне вкрапленных руд содержатся халькопирит, сфалерит и галенит, которые служат ключевым индикатором для поисков.

Сравнение геохимических аномалий по содержанию Ag, Cu и Pb до и после реконструкции представлено на рисунках 18 и 19.

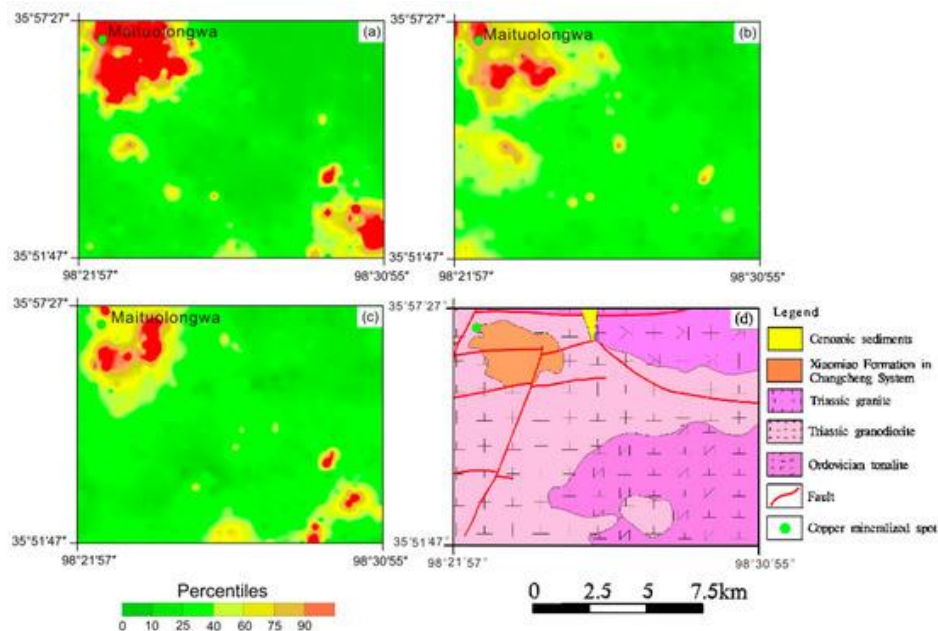


Рис. 19 Карта анализа геохимических аномалий в масштабе 1:50 000 в районе Майтуолунва: (a) Ag, (b) Cu, (c) Pb, (d) геологическая карта.

На рисунках видно, что геохимические аномалии по содержанию Ag, выделенные с разной плотностью отбора проб, имеют схожую морфологию и тенденции изменения, а их центры концентрации в значительной степени совпадают. Однако на реконструированных геохимических картах масштаба 1:25 000 аномалии, наблюдаемые на картах масштаба 1:50 000, разделены на несколько более мелких региональных аномалий. По сравнению с картами масштаба 1:50 000, аномалии на картах масштаба 1:25 000 преимущественно распределены в виде колец вдоль интрузивного контакта между раннепермским гранодиоритом и формацией

Сяомяо системы Чанчэн. Кроме того, на картах масштаба 1:25 000 видны аномалии, которые не были обнаружены на картах масштаба 1:50 000.

Сравнительный анализ участка медного оруденения Санчакоу (рис. 20) показывает, что, несмотря на отсутствие обучающих данных в масштабе 1:25 000 для этой области, реконструированная геохимическая карта в масштабе 1:25 000 всё же имеет значительные преимущества.

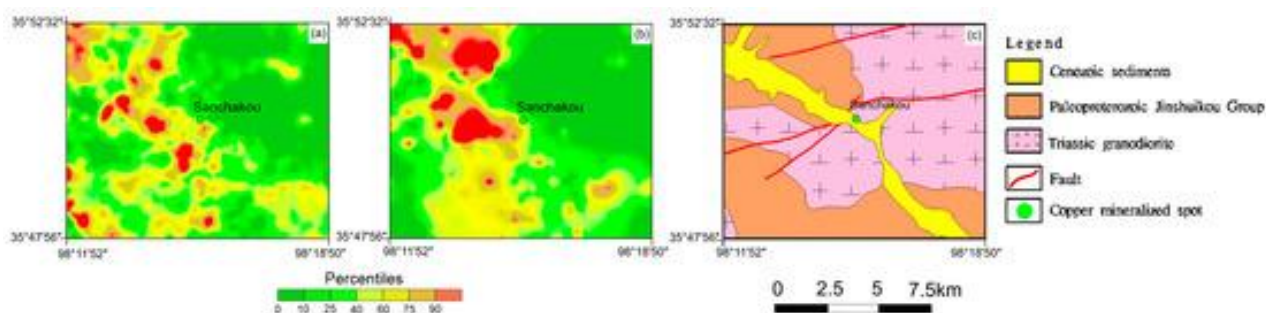


Рис. 20 Сравнение аномалий меди при разной плотности отбора проб в районе Санчакоу: (а) геохимическая карта 1:25 000; (б) восстановленная геохимическая карта 1:25 000; (с) геологическая карта.

Обнажённые литологические образования в этой области состоят в основном из мусковито-кварцевых сланцев группы Цзиньшуйкоу и триасовых гранодиоритов. Халькопиритовая минерализация происходит в основном в мусковито-кварцевых сланцах, при этом халькопирит является доминирующим рудным минералом. Реконструированная геохимическая карта масштаба 1:25 000 в целом соответствует картам масштаба 1:50 000. Однако на первом изображении видны более мелкие отдельные аномалии и более высокая пространственная корреляция между центрами концентрации и известными участками минерализации. Это преимущество обусловлено не только более высокой плотностью выборки, но и эффективностью интеграции топографической и геологической информации для обучения в отсутствие прямых обучающих данных. Реконструированная геохимическая карта эффективно устраняет проблемы смещения аномалий, вызванные рассеиванием элементов вдоль дренажных систем из-за редкой выборки при составлении карт масштаба 1:50 000. Это в полной мере демонстрирует техническое превосходство предложенного метода реконструкции в плане точного отображения информации о минерализации и повышения разрешения геохимической карты.

Более высокая плотность отбора проб при геохимическом картировании приводит к большей дисперсии данных, что указывает на повышенную локальную неоднородность распределения элементов. Эта локальная неоднородность позволяет детально охарактеризовать изменения с помощью более плотного отбора проб, что создает основу для последовательного отслеживания минерализации. Эти примеры демонстрируют, что с помощью глубокого

обучения можно извлекать подробную информацию из геохимических карт разного масштаба. Восстановленные карты не только выявляют региональные аномалии, но и обнаруживают пространственно рассредоточенные локальные аномалии минерализации небольшого масштаба, что обеспечивает более четкую характеристику аномалий.

## **5. Выводы.**

1. При геохимических поисках важнейшими задачами остаются повышение разрешения геохимических карт и точное извлечение информации о минерализации. Для решения этих задач была разработана система глубокого обучения на основе усовершенствованной архитектуры U-Net для района Гоули в провинции Цинхай, Китай. Благодаря интеграции остаточного обучения и методов извлечения многомасштабных признаков этот метод успешно повышает разрешение геохимических карт донных отложений с 1:50 000 до 1:25 000.

2. Экспериментальные результаты демонстрируют превосходство этого подхода. Предложенный метод превосходит SRCNN, VDSR и стандартные модели U-Net как по метрике PSNR, так и по метрике SSIM. Реконструированные геохимические карты высокого разрешения демонстрируют значительно более высокую детализацию, что позволяет эффективно выявлять едва заметные аномалии, которые не видны на картах низкого разрешения, и более точно определять локальную неоднородность элементов. Например, в таких районах, как Майсюлунва и Санчаоку, реконструированные карты демонстрируют более сильную корреляцию с известными зонами минерализации Ag, Cu и Pb, что обеспечивает более надёжную ориентацию при ГРП.

3. Анализ показывает, что интеграция топографических характеристик (высота над уровнем моря, уклон, экспозиция) с геологическими картами значительно повышает обобщающую способность модели, улучшая PSNR и SSIM на 10–15% по сравнению с моделями без ограничений, при этом сохраняется сильная пространственная корреляция с исходными данными высокого разрешения. Как количественный, так и качественный анализ подтверждает, что эта система может надёжно восстанавливать геохимические карты высокого разрешения на основе данных низкого разрешения, предлагая экономичный подход к получению высокоточных геохимических данных. Ожидается, что по мере увеличения объёмов геохимических данных точность этого метода будет расти. Его ценность для поисков, анализа геологической структуры и изучения эволюции окружающей среды будет возрастать, что позволит лучше продемонстрировать преимущества применения больших данных в геохимии.

## VI. ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ УТЕМ ПРИ ПОИСКАХ М-НИЙ VMS (м-ние Touro Copper, CZ Испании) [4].

### 1. Введение.

Геофизические методы сыграли важную роль в открытии сульфидных месторождений, и электромагнитные методы относятся к основным геофизическим методам, используемым при поисках м-ний массивных сульфидов (VMS). С помощью аэро- или наземной электромагнитной съемки можно идентифицировать проводящие массивные сульфидные залежи в зависимости от различной электропроводности руд (более 0,2% меди) и удельного сопротивления вмещающей породы. Проблема заключается в том, что различные геологические литологии могут вызывать сходные аномалии. Такие материалы, как графит и глина, могут вызывать электромагнитные аномалии, аналогичные аномалиям массивных сульфидов.

Для выбора возможных электромагнитных аномалий в качестве массивных сульфидных мишеней важно сочетать геофизические результаты с другими геологическими и/или геохимическими методами. Совместная интерпретация геологических, геохимических и геофизических данных является важной процедурой при определении поисковых целей.

В данном материале представлена корреляция, наблюдаемая между аномалиями электромагнитного излучения и массивными сульфидными блоками м-ния VMS Туро Коппер.

### 2. Геологические условия.

Медное м-ние Туро расположено на северо-западе Иберийского Варисканского пояса (рис. 1).

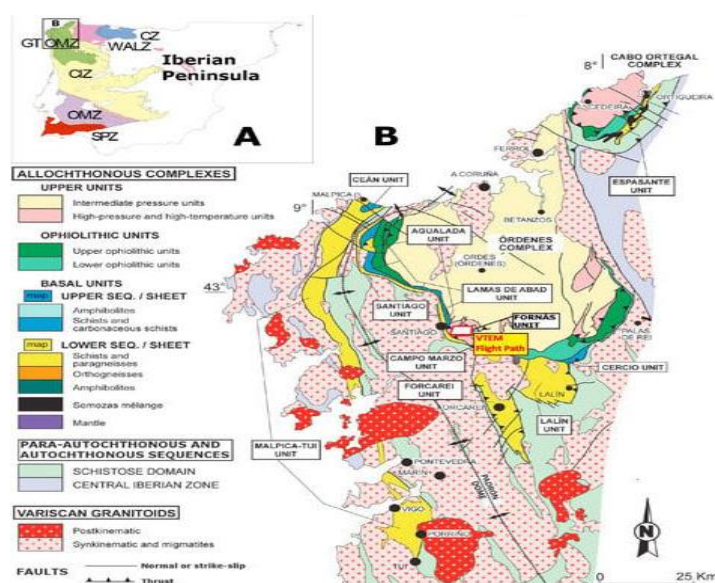


Рис. 1 Схема (А) и геологическая карта (В) Иберийского массива Варискан CZ.

Меднорудные тела расположены в комплексе Орденес, одном из четырех аллохтонных комплексов зоны Галисия-Трас-Ос-Монтес (рис. 1А). Район съемки VTEM расположен на блоке Форнас в юго-западной части комплекса Орденес (рис. 1В).

М-ние Туро Коппер расположено в мощной толще турбидитов (пелитов и грейвакков) с прослоями основных вулканических пород, отложившихся в ордовике в задуговом бассейне. Эти породы расположены в верхней части Орденского комплекса и демонстрируют метаморфизм под высоким давлением и высокой температурой, включающий трансформацию исходной кремне-кластической литологии в парагнейсы и амфиболиты.

Вмещающие породы м-ния сложены антиформой Аринтейро, образовавшейся на последней стадии Варисканского орогенеза. Минерализованные породы представляют собой преимущественно гранатовые амфиболиты, переслаивающиеся с парагнейсами, демонстрирующими линзовидную морфологию (рис. 2).

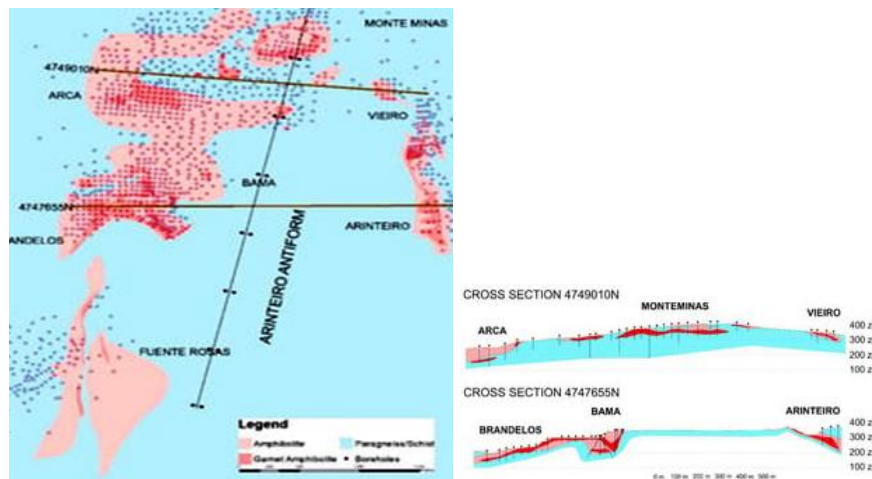


Рис. 2 Геологическая карта и поперечные разрезы с расположением скважин м-ния Туро.

Рудовмещающая стратиграфия м-ния имеет протяженность 6 км и открыта на восток и запад, с несколькими выходами сульфидов в амфиболитах с низким содержанием кальция. Минерализация представлена массивными сульфидами и стрингерами, главным образом в амфиболитах (90%) и локально в парагнейсах (10%) - пирротин, халькопирит, сфалерит и минорный пирит. Сульфиды заключены в амфиболит с низким содержанием Са.

Генезис м-ния Туро может быть классифицирован как вулканический массивный сульфид (VMS) мафито-кремне-кластического типа (тип Бесши).

### 3. Методология VTEM.

Геофизические исследования состояли из электромагнитной съемки с вертолета с использованием универсального электромагнитного оборудования во временной области (VTEM™). Система Мах с обработкой полной формы сигнала и аэромагнитным полным полем

с использованием цезиевого магнитометра. Измерения состояли из вертикальной (Z) и горизонтальной (X) составляющих электромагнитных полей  $dB/dt$  с использованием индукционных катушек. В общей сложности в ходе съемки было получено 509 погонных км геофизических данных с расстоянием между линиями 100 м и направлением полета  $N90^\circ E/N270^\circ E$  (рис. 3).



Рис. 3 Траектории полетов VTEM на топографической карте района.

Во время съемки вертолет поддерживал среднюю высоту 108 м при средней скорости съемки 80 км/ч. Это позволило достичь фактического среднего расстояния между контуром передатчик–приемник на местности в 60 м и магнитным датчиком в 98 м.

Электромагнитная система, используемая для сбора данных, представляла собой Geotech Time Domain EM (VTEM™ max, серийный номер 36, которая использует потоковую запись сигналов передатчика и приемника за половину цикла. Оборудование использует 43 временных интервала измерения в диапазоне от 0,021 до 8,083 мс. Система сбора данных Geotech записала цифровые данные на внутреннюю карту compact flash. Сбор и обработка данных проводились с использованием приложения Geosoft OASIS Montaj и программ Geotech Ltd.

Обработка магнитных данных включала коррекцию суточных колебаний с использованием цифровых значений магнитного поля земли. Аэромагнитные данные были скорректированы с учетом суточных колебаний путем вычитания наблюдаемых отклонений магнитной базовой станции.

#### **4. Сравнение измеренных данных VTEM с геологическими разрезами.**

Результаты VTEM съемки представлены в виде сложенных профилей электромагнитных напряжений для элементов times, в линейно-логарифмическом масштабе для компонента В-поля и откликов  $dB/dt$  в компонентах Z и X. Z-компонент В-поля представлен временным каналом, зарегистрированным через 1.161 миллисекунду после окончания импульса.

На основе Z-компонента профилей 43 dB / dt с временными интервалами 0,210–7,036 были разработаны три карты электромагнитных аномалий VTEM для каналов SFz20 (временной интервал 0,220 мс), SFz25 (временной интервал 0,440 мс) и SFz30 (временной интервал 0,880 мс). Предварительный корреляционный анализ между геологией м-ния Тоуго и картами аномалий VTEM показал, что на карте SFz25 получено лучшее разрешение. Аномальные зоны имели постоянные времена dB/dt в диапазоне примерно от 0,2 до 5,36 мс. Кажущееся удельное сопротивление аномальных зон оценивалось менее чем в 150 Ом · м. Согласно изображениям глубины видимого удельного сопротивления по всем линиям, расчетная глубина аномальных зон составляла приблизительно от приповерхностной зоны до 120 м. Аэромагнитные данные представлены на цветной карте общей магнитной напряженности (ТМІ), приведенной к полюсу (RTP).

Успех аэро-электромагнитной съемки при поисках крупных сульфидных м-ний связан с контрастом удельного сопротивления между целевой минерализацией и вмещающей породой. В связи с этим были проведены обширные измерения удельного сопротивления кернов буровых установок большинства известных рудных тел м-ния. Результаты показали, что массивная сульфидная руда Тоуго обычно имеет плотность порядка 0,25 Ом м (проводимость 4S/m), а вмещающая порода находится в диапазоне 1000-30 000 Ом м. В ходе этого тестирования единственным свидетельством наличия графита, который является источником, способным вызвать ложноположительный электромагнитный отклик, было рудное тело Фуэнте Росас. В Туро удельное сопротивление графитосодержащих образцов редко опускалось ниже 100 Ом м, что позволяет с уверенностью предположить, что в этом случае графит не будет в сколько-нибудь значительной степени препятствовать обнаружению рудной минерализации.

Чтобы продемонстрировать корреляцию между электромагнитными аномалиями профилей VTEM и рудной зоной Тоуго (более 0,2% меди), геологический разрез AR-5 рудного тела Монтеминас был нанесен под профилями VTEM SFz EM. Массивные перехваты сульфидов мощностью ~ 50 м, сосредоточенные на 554 300, коррелировали с пиковым откликом VTEM на L1150 и показали электропроводность от 47 до 70 Си в Северном блоке Монтеминас. На геологическом разрезе можно наблюдать северный блок Монте-Минас в шарнире и восточной оконечности антиформы Аринтейро с понижением залегания от 10° до 25° восточной долготы, а на западной оконечности северный блок Арка понижается на 30° западной долготы (рис. 4, 5).

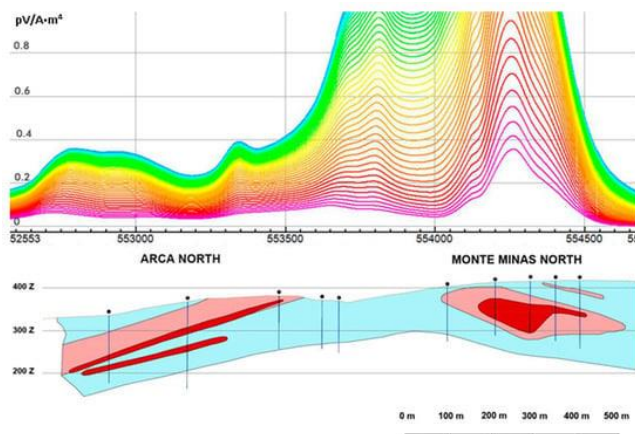


Рис. 4 Процессы VTEM SfZ на линии L1150, над геологическим разрезом AR-5 (условные обозначения на рис. 2).

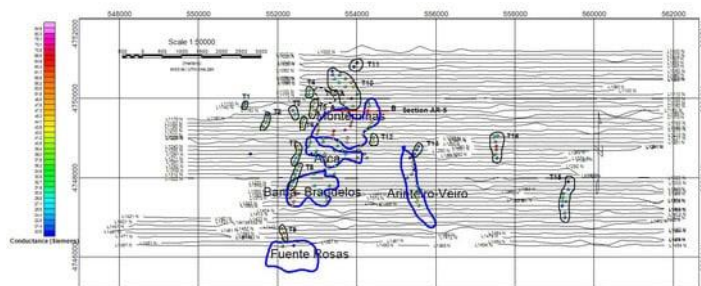


Рис. 5 Аномалий VTEM с проводимостью  $>20$  за пределами известной рудной зоны от T1 до T15. (черные контуры - 15 новых аномалий, синими - существующие рудные блоки м-ния Touro VMS).

Результаты VTEM-съемки 2018 года были уточнены с использованием электромагнитных аномалий с проводимостью  $> 20$  Си (рис. 5). Наилучшее разрешение было получено в профилях электромагнитного излучения SFz25, канал 25 компонента dB/dt Z с фильтрацией Фрейзером (временной интервал 0,440 мс) (рис. 6).

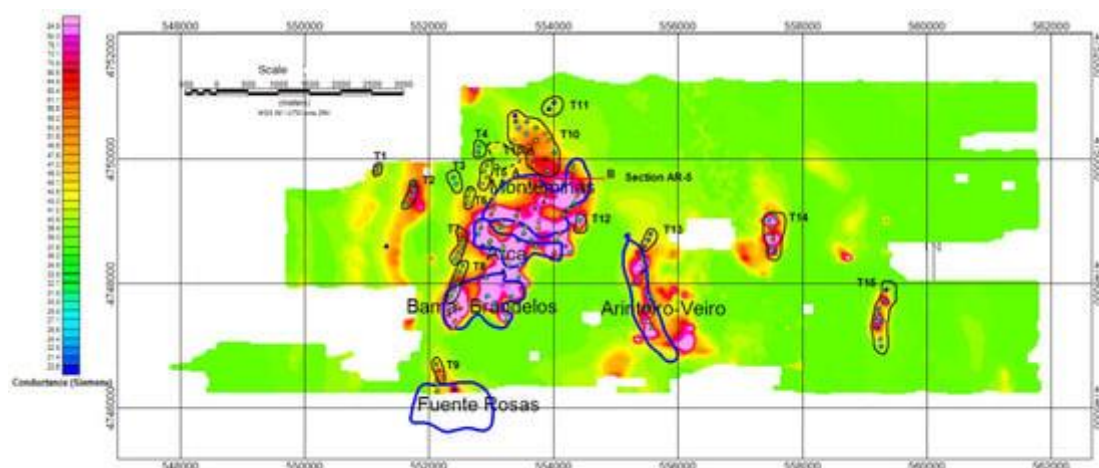


Рис. 6 Электромагнитный канал VTEM SFz25 (цветной фон), известные рудные тела (синие контуры).

Для каждой линии съемки выделены аномалии цветом  $>20$  Симен. Все рудные тела Тоуго с содержанием меди  $>0,2\%$  Си демонстрировали электромагнитную аномалию со значениями pick до 88 Симен (L1374 в рудном теле Аринтейро). Были выделены пятнадцать новых аномалий от T1 до T15 со значениями Siemens pick  $>20$ . Максимальное значение было получено

в мишени F14, с контрольным значением 298 Сименс (L1241). Аномалии VTEM обозначаются цветными символами со значениями  $>20$  Симен, что позволяет определить дополнительные области интереса, обозначенные как цели от T1 до T15 (черные контуры).

Аэромагнитная карта показана на рисунке 7 в виде общей магнитной напряженности (TMI), приведенной к полюсу (RTP).

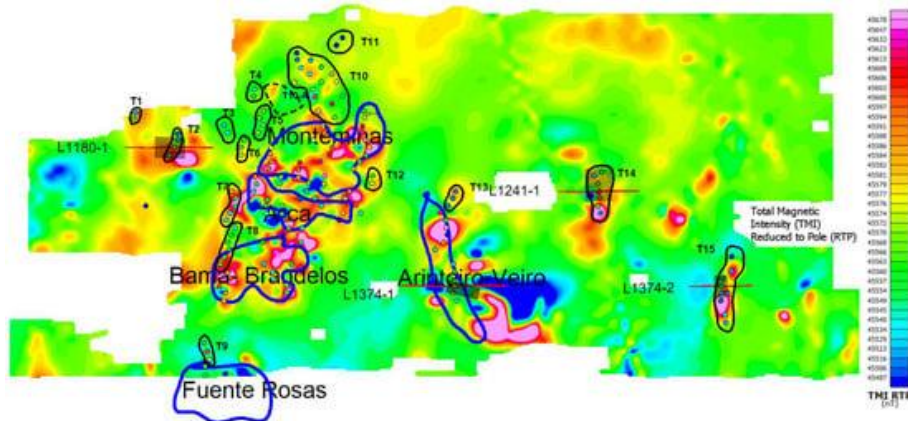


Рис. 7 Цветное изображение магнитного поля, рудные тела (синие контуры), цветные точки  $>20$  Сименс.

На этой карте обозначены существующие рудные блоки Тоуго VMS (синие контуры) и электромагнитные аномалии новых объектов (черные контуры). В целом магнитные аномалии были менее четко определены, чем электромагнитные аномалии, и связь с известными рудными телами также была менее четкой. Те же выводы были получены в отношении электромагнитных аномалий новых объектов.

Разрезы VTEM, смоделированные с помощью технологии электромагнитной визуализации Maxwell (красная горизонтальная линия) на рисунках 8 - 11.

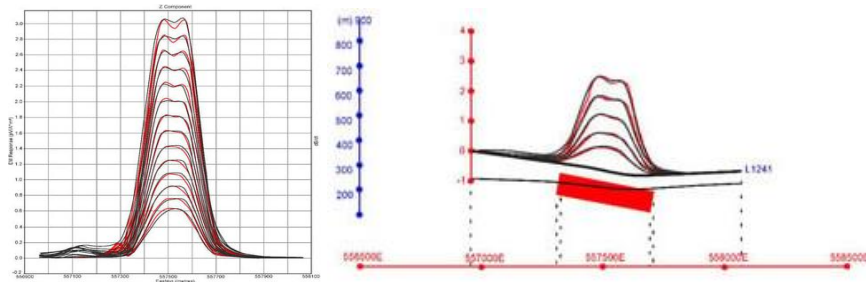


Рис. 8 Максвелловское моделирование мишени T-14 с толстой пластиной, обращенной на север.

Черные линии представляют собой полевые данные Z-компонента линии полета VTEM L1241-1, а красные линии указывают сигналы с моделируемой пластины. Верхняя часть моделируемого проводника находится близко к поверхности и опускается на  $10^\circ$  к востоку, проводимость составляет 320с. Длина его простирается составляет 370 м.

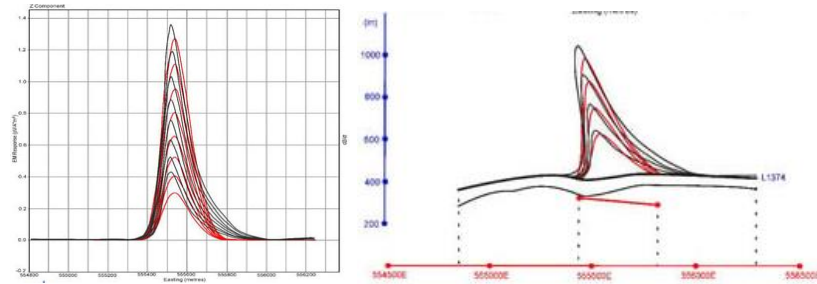


Рис. 9 Моделирование Максвелла на тонких пластинах зоны L1374-1 Arinteiro, обращенной на север.

Черные линии представляют собой полевые данные Z-компонента линии полета VTEM L1374-1, а красные линии указывают сигналы с моделируемой пластины. Верхняя часть моделируемого проводника находится близко к поверхности и опускается на  $5^\circ$  к востоку, с проводимостью 104с. Длина его простираения составляет 375 м.

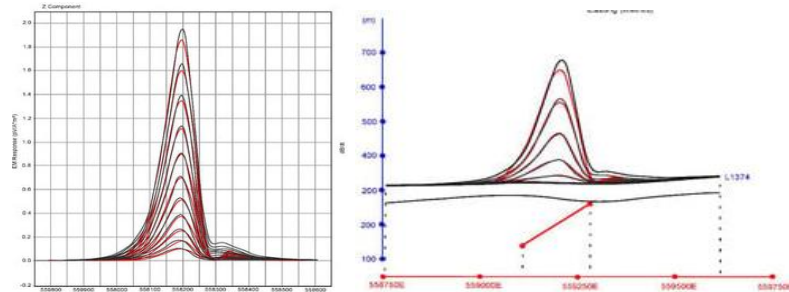


Рис. 10 Максвелловское тонкопластинчатое моделирование мишени L1374-2, T-15, обращенной на север.

Черные линии представляют собой полевые данные Z-компонента линии полета VTEM L1374-2, а красные линии указывают сигналы с моделируемой пластины. Верхняя часть моделируемого проводника находится близко к поверхности и опускается на  $35^\circ$  к западу, с электропроводностью 90С. Длина его простираения составляет 425 м.

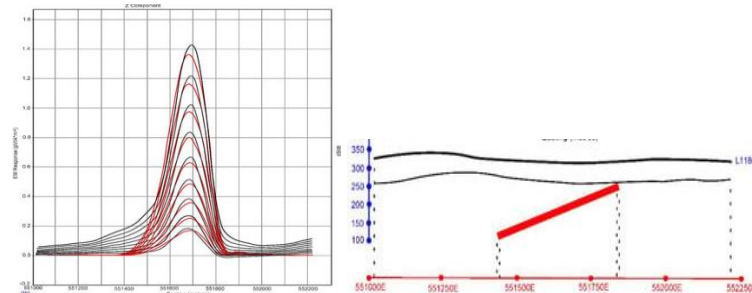


Рис. 11 Максвелловское моделирование толстой пластины объекта L1180, T-2, обращенной на север.

Черные линии представляют собой полевые данные Z-компонента линии полета VTEM L1180, а красные линии указывают сигналы с моделируемой пластины. Верхняя часть моделируемого проводника находится близко к поверхности и опускается на  $20^\circ$  к западу, с проводимостью 81 Сек.

## 5. Моделирование.

Пластинчатое моделирование аномалий E-W тренда проводилось по новым объектам, которые были признаны наиболее приоритетными, т.е. T2, T14 и T15, а также по профилю в

центре м-ния Аринтейро (разрез L1374-1). Они были построены с видом на север. Выбор конкретных аномалий в районе Тоуго был сделан на основе геологической и структурной информации, доступной в зоне обследованного района, а также простоты ответов VTEM.

Разрезы VTEM были смоделированы с помощью технологии 3D Maxwell Electro Magnetic Imaging, разработанной ЕМІТ (Перт, Австралия). Исходные значения удельного сопротивления для фона и модели аномалий были выбраны на основе петрофизических исследований. Размеры и ориентация пластин были получены на основе геологической модели Тоуго. Наиболее важными из этих параметров являются направление падения и длина простираия, а также информация о межстрочном интервале для съемки. Моделирование плиты Максвелла было усовершенствовано несколькими подходами.

Использовали моделирование пластинчатых мишеней, потому что результаты были более четкими и хорошо коррелировали с геологической моделью Тоуго по сравнению с инверсионным моделированием. Инверсионное моделирование показало отрицательные результаты, и модели пластин не имели корреляции с геологическими рудными блоками Тоуго. Это связано с тем, что реальная проводимость является непрерывной функцией. Таким образом, обратная электромагнитная задача не имеет уникального решения и может быть получено несколько моделей. В данном случае имела место высокая степень несоответствия данных модели с существенной ошибкой в моделировании инверсионной пластины Максвелла.

Выбранные четыре аномалии VTEM были смоделированы с использованием тонкой пластины Максвелла в секторах 1 и 2 линии L1374 и толстой пластины Максвелла в линиях L1241-1 и L1180, расположенных на рисунке 7. Алгоритм пластины Максвелла предполагает, что проводящая пластина находится в очень резистивном узле. Для получения этого приближения использовали данные из каналов среднего и позднего времени, в данном случае каналов 20-30, оставив для моделирования только проводящий отклик объектов. На основе моделирования можно получить размер, форму, глубину и угол погружения одного проводника и его отклик VTEM в компонентах X и Z. Согласно геологической модели рудного м-ния Тоуго, моделирование плиты Максвелла проводилось в Z-компоненте, поскольку рудные блоки по существу имеют табличную форму с уменьшенной толщиной по сравнению с двумя другими измерениями, когда проводящая пластина расположена горизонтально, отклик VTEM в Z-компоненте представляет собой одиночный пик чуть выше цели.

Для вертикальной проводящей пластины отклик Z-компонента VTEM представляет собой двойной пик, расположенный на верхней части проводника для тонкой пластины, а для толстой пластины имеется одиночный пик с широким дном. Если токопроводящая пластина погружена

более чем на  $40^\circ$ , Z-составляющая электромагнитного отклика представляет собой большой пик и малый пик.

Результаты моделирования толстой пластины L1241-1, мишени T-14, показаны на рисунке 8. Черные линии представляют собой полевые данные Z-компонента линии полета VTEM L1241, а красные линии указывают сигналы от моделируемой пластины. Верхняя часть проводника находится близко к поверхности. Длина простирается составляет 370 м, электропроводность 320 Сименс, а угол наклона к востоку составляет  $10^\circ$ .

На рисунке 9 показано Максвелловское тонкопластинчатое моделирование линии L1374-1 на рудном блоке Аринтейро. Верхняя часть проводника расположена близко к поверхности. Длина простирается составляет 375 м, электропроводность 104 Симена, а угол наклона к востоку -  $5^\circ$ .

Модель тонких пластин Maxwell для линии L-1374-2, мишень T-15, показана на рисунке 10. Верхняя часть проводника расположена близко к поверхности. Длина простирается составляет 425 м, электропроводность - 90 Сименс, а угол наклона к западу -  $35^\circ$ .

Последней созданной моделью было моделирование толстых пластин Maxwell line L1180, мишень T-2 (рис. 11). Верхняя часть проводника находится близко к поверхности. Длина простирается составляет 300 м, электропроводность 81 Сименс, а угол наклона к западу -  $20^\circ$ .

Все четыре модели с одной пластиной достаточно хорошо согласуются с полевыми данными. Общая ошибка для Z-компонента была расценена как низкая, поскольку она составляла менее 5%.

Направления падения трех из четырех пластин соответствовали местоположению антиформы Аринтейро. L1241 и L1374 расположены на восточном склоне антиформы и опускаются к востоку. L1180 расположен на западном склоне антиформы и опускается к западу.

## **6. Выводы.**

1. Пластинчатое моделирование данных VTEM с воздуха подтвердило геометрию и электропроводность рудных тел, уже известных по результатам бурения. Кроме того, крупномасштабные полеты VTEM обнаружили ранее неизвестные рудные тела. Направления падения трех из четырех показанных пластин соответствовали местоположению антиформы Аринтейро. Линии L1241 и L1374 расположены на восточном склоне антиформы и опускаются к востоку; L1180 расположена на западном склоне антиформы и опускается к западу. Моделирование самой восточной аномалии показывает наклонную к западу пластину, которую можно интерпретировать как параллельную антиформную структуру.

2. Смоделированные значения электропроводности хорошо согласуются с данными, предоставленными Geotech Limited, и измерениями удельного сопротивления/электропроводности, выполненными на массивных образцах сульфидов из нескольких рудных тел Тоуго. Сочетание плоских провалов, хорошей электропроводности, небольшой глубины и отсутствия электропроводящих вскрышных пород или неэкономичной электропроводящей стратиграфии, такой как графитовые сланцы и сульфидные железистые формации, сделало проект Тоуго идеальной целью для аэро-электромагнитной разведки.

3. Аэро-электромагнитная съемка VTEM над территорией проекта Тоуго оказалась успешной при составлении карт всех известных рудных тел Тоуго, т.е. Монтеминас, Бама, Арка и Аринтейро, а также обнаружении нескольких новых объектов с высокой вероятностью, связанных с минерализацией, т.е. T-2, T-14 и T-15, и подтверждении вероятного расширения рудного тела Монтеминас в северном направлении на глубину.

4. Благоприятными факторами, способствовавшими успеху съемки, были высокий контраст в удельном сопротивлении/проводимости между массивной сульфидной рудой Тоуго и вмещающими ее амфиболитом и парагнейсом, а также минимальные помехи от “неприятных” проводников, таких как графитовые сланцы.

5. Полученные результаты показали, что программное обеспечение Maxwell было адекватным выбором для моделирования электромагнитных волн в районе Туго. Концептуальная модель с тонкими и толстыми слоями в программном обеспечении Maxwell аппроксимировала реальную электропроводность.

## VII. ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МИНЕРАЛОГИИ В ПОИСКОВЫХ ЦЕЛЯХ (*медно-порфировой район Хайленд-Вэлли, Канада*) [5].

### 1. Введение.

Анализ данных гидротермально-метасоматических изменений пород используются для определения минерализованных центров рудных порфировых систем. Однако гидротермальные изменения часто состоят из мелкозернистых скоплений, которые трудно идентифицировать невооруженным глазом. Изменения также часто носят телескопический характер, и ранние минералы могут частично или полностью перекрываться более поздними, более низкотемпературными проявлениями, что усложняет геологические интерпретации. На практике, в контексте поисковых признаков, минералогические закономерности, ожидаемые на основе генетических моделей, могут быть трудно распознаваемы. Последовательное выявление минералогических изменений требует высококвалифицированных геологических знаний и анализа тонких петрографических разрезов, а также, как правило, требует поддержки более сложных приборов, таких как электронно-зондовые микроанализаторы (EPMA) или рентгеновские дифрактометры (XRD). Однако образцы, исследованные с использованием этих методов, ограничены по физическому размеру, чтобы соответствовать инструментам (т. е. в лучшем случае, тонкие срезы или образцы), и могут не охватывать всю минералогическую изменчивость, присутствующую в данной породе. Кроме того, несмотря на предоставление качественных данных, эти приборы, как правило, дороги и требуют много времени в эксплуатации. Из-за этого наборы данных, как правило, ограничены по объему (т. е. максимум несколькими сотнями образцов), что позволяет определить только общие тенденции в региональных моделях изменений.

Напротив, коротковолновая инфракрасная спектроскопия отражения (SWIR) является хорошо подходящим методом для быстрого определения минералогических изменений, поскольку подготовка образца не требуется, а время сбора данных составляет порядка нескольких секунд для каждого образца. В гидратированных минералах связи катион-ОН создают характерные особенности поглощения в диапазоне длин волн SWIR, которые могут быть использованы для идентификации минералогии, а во многих случаях также позволяют оценить химический состав минералов. Кроме того, на спектроскопию отражения не оказывает отрицательного влияния мелкозернистый характер измененных минералов.

Данные SWIR использовались в многочисленных исследованиях для характеристики минералогии изменений в различных геологических условиях, включая несколько порфирово-медных месторождений.

В медно-порфировом районе Хайленд-Вэлли (HVC) в Британской Колумбии, Канада, находятся четыре основные системы Cu- (Mo) порфиров, которые сформировались на более глубоких уровнях, чем типичные месторождения порфир-Cu, и демонстрируют относительно ограниченный ореол изменений, усложняя ГПП. Текущее исследование основано на наборах данных гиперспектральных изображения SWIR полученных на 755 образцах. Кроме того, специально для этого исследования несколько сотен метров непрерывного керна были также отсканированы в SWIR. Поскольку породы в районе HVC представляют значительную минералогическую сложность гиперспектральные изображения получены в высоком разрешении (0,2-0,5 мм/пиксель), чтобы различить изменения, происходящие между жилами, прожилками и краями жил. Данные также собираются со скоростью 1 мм/пиксель по всему непрерывному керну для определения полной степени изменения окружающих минерализованных интервалов.

Спектрально обнаруживаемые минералогические паттерны исследуются в региональных масштабах и суммируются с помощью единой оценки спектральных изменений, которая действительна для всего района HVC. Этот единый показатель может облегчить поиски в региональном масштабе, предоставляя исследователям быстрый, относительно недорогой и объективный показатель для количественной оценки гидротермальных изменений в данном образце. Аэро-гиперспектральные изображения (ДДЗ) могут быть использованы для создания региональных карт изменений, хотя и только в средах с меньшим растительным покровом, чем в HVC.

## **2. Региональная геология.**

HVC, включающий по меньшей мере четыре минерализованных центра, расположен на юге Британской Колумбии, Канада. Район расположен на концентрически зонированном батолите Гишон-Крик размером 60 x 25 км в южной части террейна Кенель, в пределах Межгорного пояса. Известково-щелочной батолит Гишон-Крик I типа был внедрен в вулканогенно-осадочные породы группы Никола террейна Кенель по меньшей мере тремя магматическими импульсами между  $\approx 211$  и  $\approx 207$  млн лет назад (рис. 1).

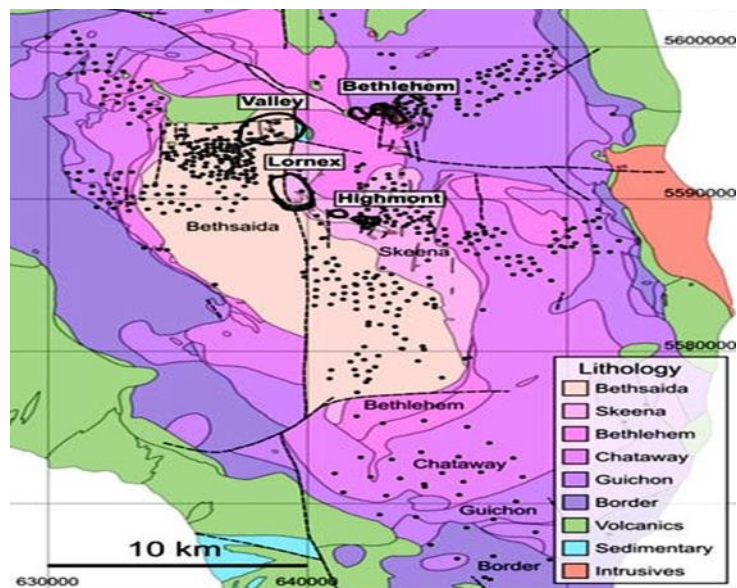


Рис. 1. Региональная литологическая карта батолита Гишон-Крик с обозначенными литофациями.

Указаны местоположения основных центров порфиров. Точками обозначены местоположения 755 образцов горных пород, использованных в этом исследовании.

Непрерывная дифференциация магмы привела к образованию концентрически зонального батолита, включающего шесть текстурно и композиционно различных фаций, варьирующихся от габбро по краям до гранитов вблизи ядра, но в основном состоящего из гранодиоритов. По всему району обнаружено по меньшей мере шесть разновидностей даек до, син- и постминерализации.

Известно, что в батолите присутствуют по меньшей мере четыре крупных медно-порфировых м-ний, которые залегают в кислом ядре батолита Гишон-Крик, и включают два события минерализации. Первое событие минерализации Cu последовало за формированием вифлеемской фации и произошло с внедрением даек порфира и брекчий в эту фацию, сформировав Вифлеемское м-ние. Второе, более крупное событие минерализации Cu-Mo последовало за формированием бетсаидской фации и привело к образованию отложений Вэлли–Лорнекс и Хаймонт. Первоначально смежное м-ние Вэлли–Лорнекс было разрезано поздним разломом Лорнекс, что привело к смещению отложений Вэлли и Лорнекс примерно на 3,5 км. Поздние возрасты молибденита из Вэлли-Вэлли были зарегистрированы на уровне  $206,7 \pm 1,5$  млн лет и  $205,8 \pm 1,5$  млн лет, хотя минерализация молибденита интерпретируется как более молодая по сравнению с основной минерализацией меди. Аналогичный возраст был зарегистрирован для м-ний Хаймонт и Лорнекс ( $208,3 \pm 1,0$  млн лет и  $208,4 \pm 0,9$  млн лет).

### 3. Геология месторождения.

Хайленд-Вэлли является крупнейшим м-нием порфира в Канаде и разрабатывается с 1962 года. Отложения Хайленд-Вэлли были образованы когенетическими вмещающими породами плутонического происхождения на относительно более глубоких уровнях (4-5 км, чем типичные отложения порфира, которые образуются в залежах над исходными плутонами (обычно верхние 4 км земной коры). Гидротермально-метасоматические изменения в районе Хайленд-Вэлли в целом соответствуют закономерностям изменений, обычно распознаваемым в Cu-порфировых м-ниях. Были задокументированы типичные зоны изменений калийных, филлитовых, глинистых и пропилитовых. Минерализация преимущественно встречается в жилах, трещинах, разломах, а в случае м-ния Вифлеем - в брекчиях. Как правило, вблизи ядра м-ний борнит является наиболее распространенным сульфидом, подразделяющимся на халькопирит и пирит.

Калиевые изменения происходят рядом с минерализованными кварцевыми жилами и характеризуются K-полевым шпатом и незначительным вторичным биотитом. Местные брекчии, сцементированные турмалином, встречаются вблизи м-ний Вифлеем и Хаймонт. Филловые изменения, тесно связанные с минерализацией, наиболее заметны на м-ниях Вэлли и Лорнекс, состоящих из грубых серых отложений мусковита вокруг кварцевых жил шириной до нескольких сантиметров. Это богатое мусковитом изменение в некоторых случаях называют "серичитовым" или "типом раннего гало". Крупнозернистый зеленоватый фенгитовый мусковит также был описан как составляющий часть зоны внешних филлических изменений на м-ниях Вэлли и Вифлеем. Повсеместное изменение глинистости (каолинит ± монтмориллонит) примыкает к филлическим зонам и переходит в повсеместное изменение пропилита (эпидот±пренит±хлорит±карбонат). По результатам измерений SWIR пренит был признан важным минералом в дистальной зоне изменений пропилита. Пренит встречается либо в виде прожилок темно- или светло-мятно-зеленого цвета размером мм с обширными рассеянными ореолами пренита в большем количестве кислых пород, либо в виде наслоений вокруг жил эпидота. Было отмечено, что прожилки пренита (и связанные с ними изменения хлорит-белая слюда) обычно преломляют и перекрывают более ранние прожилки и ореолы их изменений, что приводит к сложным закономерностям изменений в большинстве образцов и усложняет их интерпретацию.

## **4. Методы**

### ***4.1. Набор образцов.***

В рамках проекта была собрана коллекция из более чем 800 образцов, из которых доступны тонкие срезы и составы основных и микроэлементов в цельной породе (включая содержание меди). Вблизи м-ния образцы отбирались с интервалом примерно 200 м, но плотность отбора проб снизилась до одного на километр по направлению к внешним границам батолита. Подмножество из 755 из этого набора образцов было визуализировано в SWIR, чтобы идентифицировать минеральные ассоциации, связанные с проксимальными и дистальными изменениями. Этот гиперспектральный набор данных высокого разрешения позволяет получить представление о мелкомасштабной (от миллиметра до сантиметра) минералогической изменчивости, часто наблюдаемой между жилами, прожилками и их гранями изменений. В совокупности этот набор образцов дает представление о минералогических закономерностях регионального масштаба, встречающихся в батолите Гишон-Крик.

Второй набор образцов из 400 м керна, был выбран для получения гиперспектральной визуализации со скоростью 1 мм/пиксель. Этот керн из гранодиорита пересекает как минерализованные, так и неминерализованные интервалы и служит для лучшего определения пространственной непрерывности масштабов изменений вблизи Cu-минерализованных зон на промежуточных масштабах (т. е. от десятков сантиметров до метров), превышающих то, что можно наблюдать на одном образце. Этот непрерывный набор данных также позволяет установить корреляции между минеральными ассоциациями и содержанием Cu.

### ***4.2. Сбор гиперспектральных данных.***

Гиперспектральные изображения были получены в SWIR (от 1000 до 2500 нм) с помощью гиперспектрального сканера Specim SisuROCK (устройство линейного сканирования изображений) в Университете Альберты, Эдмонтон, Канада. Этот прибор содержит матрицу детекторов ртути, кадмия и теллурида (МСТ) размером 256 на 320 пикселей в пространстве, которая получает данные с интервалом выборки 6,3 нм и полосой пропускания 10 нм. Прибор был оснащен объективом OLES56 (с высоким разрешением) или OLES15 (с низким разрешением), которые, соответственно, давали пространственное разрешение 0,2–0,5 мм/пиксель или 1 мм/пиксель. Темновой ток и 99%-ная отражательная способность белой панели Spectralon™ измерялись в начале каждой последовательности сбора данных, и данные о яркости геологического объекта преобразовывались в коэффициент отражения путем вычитания темнового тока, а затем путем нормализации к данным о яркости белой панели. Керны сканировались со скоростью 1 мм/пиксель с помощью объектива низкого разрешения, а шлифы сканировались со скоростью 0,5 мм/пиксель или 0,2 мм/пиксель с помощью объектива

высокого разрешения. Указанные положения поглощения (спектральная точность) прибора были откалиброваны по стандарту майлара, на который ссылается Национальный институт стандартов и технологий (NIST). Самое сильное поглощение стандарта измерено при 1660 нм, что соответствует эталонному значению NIST 1659,9 нм  $\pm$ 1 нм. Спектральный дрейф (т. е. изменения в сообщаемых положениях поглощения с течением времени) оценивался с использованием эталонного образца биотита, измеряемого при каждом сеансе сканирования, и оставался ниже 1 нм для всего набора данных.

#### ***4.3. Спектральный анализ данных.***

Анализ спектральных данных требует обнаружения признаков поглощения, которые используются для уникальной идентификации минералов. Для определенных минералов химический состав или размер зерен также могут быть оценены по спектральным характеристикам, либо по точному положению, либо по силе специфических характеристик поглощения. Учитывая относительно грубый интервал выборки спектрометра imaging 6,3 нм, спектры необходимо интерполировать, чтобы получить точные (и, в конечном счете, достоверные) положения поглощения. Здесь спектральный анализ данных выполнен с использованием метода, где были предоставлены дополнительные подтверждающие данные, чтобы показать эффективность методологии интерполяции, включая сравнения со справочным материалом NIST, а также регрессии, установленные между интерполированными положениями поглощения и химическим составом минералов, полученными на основе данных электронного микросондирования. Спектры анализируются на основе данных на пиксель и сначала линейно интерполируются с частотой дискретизации 1 нм. Интерполированные спектры затем сглаживаются путем свертки с помощью функции Гаусса с половинным максимумом полной ширины (FWHM) 25 нм. Интенсивность и положение признаков поглощения затем определяются с помощью производного анализа по максимумам второй производной свернутых спектров. На уровне образца (т. е. для изображения шлифа размером 10 x 10 см, состоящей из 200  $\times$  200 пикселей) сообщается среднее положение поглощения всех пикселей, рассчитанное как положение поглощения для каждого пикселя, взвешенное по силе поглощения данного пикселя. Для облегчения идентификации определенных минералов также используется спектральный наклон между двумя определенными длинами волн, который рассчитывается на основе необработанных данных (т.е. неинтерполированных, не снятых с континуума спектров).

#### ***4.4. Идентификация минералов.***

Минералы, которые могут встречаться в исследуемом наборе образцов, идентифицируются на основе дополнительных геологических знаний о медно-порфировых

месторождениях, а также на основе известных характеристик м-ний Хайленд-Вэлли. Предыдущие исследования выявили присутствие, среди прочего, крупнозернистого мусковита, каолинита, турмалина, хлорита, эпидота, смектита и пренита. Спектральные характеристики этих минералов изучаются либо из существующих спектральных библиотек (например, спектральной библиотеки Геологической службы США), либо из образцов, о присутствии которых известно, что минерал встречается, в идеале в чистом виде. Затем идентифицируются уникальные для этих минералов характеристики поглощения (если таковые имеются), и для каждого минерала выбирается один или несколько диагностических показателей поглощения. Если диагностического поглощения не существует, выбирается комбинация недиагностического поглощения и определенного спектрального наклона в данной спектральной области. Гиперспектральные данные для всех образцов затем обрабатываются производным анализом для выявления всех особенностей поглощения, встречающихся в наборе данных. Любое поглощение, происходящее в местах, не идентифицированных на этапе идентификации минералов, подвергается дальнейшему исследованию, поскольку оно может указывать на присутствие неопознанных минералов. Таким образом было идентифицировано несколько дополнительных минералов, в том числе пумпеллиит (поглощение при 1510 нм) и гипс (поглощение при 1490 нм).

Исследованные здесь образцы обычно демонстрируют присутствие по меньшей мере 10 спектрально активных минералов (т. е. обладающих характерными характеристиками поглощения), в дополнение к спектрально неактивным кварцу и сульфидам (т.е., по сути, имеющим плоскую спектральную характеристику). Для каждого минерала типичный спектр, полученный из текущего набора образцов, представлен на рисунке 2, и указаны спектральные параметры, используемые для идентификации.

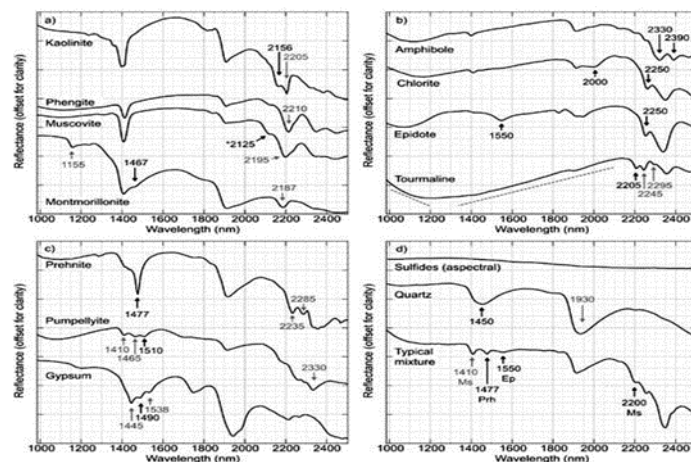


Рис. 2 Спектры минералов из набора образцов из средних значений  $3 \times 3$  пикселя (а-спектры Al-содержащих филлосиликатов, поглощение белой слюды длиной волны 2125 нм обнаруживается только в крупнозернистых образцах; б-спектры минералов, содержащих (Fe, Mg); в-спектры минералов, содержащих Ca; д-спектры минералов (вверху) и типичной минеральной смеси (внизу), показывающие пренит, эпидот и белую слюду в одном спектре).

Поглощения, используемые для идентификации, обозначены черными стрелками, а дополнительные отличительные поглощения (здесь не используются) выделены серым цветом. Пунктирными линиями обозначены области, где минералы идентифицируются с использованием наклона спектра (соотношения полос). Спектры смещены и масштабированы для большей четкости. Спектральные характеристики, используемые для идентификации минералов, представленные на рисунке 2, также представлены в таблице 1, в которой дополнительно представлен список минералов, которые потенциально могут вызывать спектральные помехи.

Табл. 1.

**Минералогия, обнаруживаемая спектрально в Хайленд-Вэлли.**

| General Group       | Mineral   | Diagnostic Absorptions                                   | Causes Interference to:        |
|---------------------|---|--|--------------------------------|
| Al-bearing          | Montmorillonite (Mnt)<br>$(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$         | 1467 nm  |                                |
|                     | Kaolinite (Kaol)<br>$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$   | 2160 nm  | Mt, Ms, Tr                     |
|                     | Muscovite (Ms)<br>$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$   | 2125 nm, 2200 nm<br>(coarse grained only)                | Kaol, Mt, Tr                   |
| Ca-bearing          | Gypsum (Gyp)<br>$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   |  | Pump                           |
|                     | Prehnite (Prh)<br>$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$   | 1477 nm  | Chl (2250 nm)                  |
|                     | Pumpellyite (Pmp)<br>$\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$ | 1510 nm  | -                              |
| (Fe,Mg)-bearing     | Epidote (Ep)<br>$\text{Ca}_2(\text{Al, Fe})_2(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$   | 1540 nm<br>2250 nm                                       | Chl (2250 nm), Tr              |
|                     | Amphibole (Am)<br>$\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$   | 2330 nm<br>2390 nm                                       | Chl                            |
|                     | Chlorite (Chl)<br>$(\text{Mg, Fe})_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$   | 2000 nm<br>2250 nm                                       | Amp, Ep, Tr                    |
|                     | Tourmaline (Tur)<br>$\text{Na}(\text{Mg, Fe})_3\text{Al}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3(\text{OH})$              | 2205 nm<br>2245 nm                                       | Ms, Kaol, Mt, Chl<br>(2250 nm) |
|                     |   | Slope 1000 nm/1180 nm                                    |                                |
| Spectrally inactive | Sulfides (Sulf.)<br>[(Cu], Fe) $\text{S}_2$   | Flat spectrum  | -                              |
|                     | Quartz (Qz)<br>$\text{SiO}_2$   | Inferred from 1450 nm<br>$\text{H}_2\text{O}$ absorption | -                              |

В качестве примера процесса идентификации минерала пренит может быть однозначно идентифицирован по наличию единичного диагностического поглощения при 1477 нм (рис. 2с). Турмалин, может быть идентифицирован только по комбинации недиагностируемого поглощения при 2205 нм (поглощение в этом положении также может быть вызвано каолинитом или белой слюдой), а также по сильному отрицательному спектральному наклону между 1000 и 1200 нм и сильному положительному наклону между 1400 и 2100 нм (спектральные наклоны обозначены пунктирными линиями (рис. 2б). Наличие спектрально неактивных минералов также можно определить по спектральным характеристикам. Например, кварц идентифицируется по наличию широкого поглощения, связанного с водой, около 1450 нм (по включениям жидкости), в то время как о присутствии сульфидов можно судить по пикселям, которые показывают плоскую спектральную характеристику во всем спектральном диапазоне SWIR (т. е. по спектральным пикселям). Спектральные пиксели идентифицируются как пиксели, не имеющие обнаруживаемого поглощения вблизи 1400, 1900, 2200 или 2350 нм,

а затем дополнительно фильтруются для исключения пикселей со спектральным наклоном от 1000 до 1200 нм, связанных с электронным поглощением железа. Во всех случаях представленные здесь спектры имеют высокую степень сходства с теми, которые доступны в спектральной библиотеке Геологической службы США. Несколько тонких срезов, доступных из набора образцов, также служили для подтверждения природы минералов, которые были идентифицированы спектрально, но не были заметны невооруженным глазом (т. е. присутствие зеленого эпидота или черного турмалина можно легко подтвердить невооруженным глазом, но бледно-зеленоватый пренит и пумпеллит визуально идентифицировать нелегко).

В большинстве образцов в текущем исследовании распространены минеральные смеси, при которых несколько минералов могут присутствовать в пределах заданного пикселя (т. е. в одном спектре). Во многих случаях, таких как спектр смеси (рис. 2d), характеристики поглощения, уникальные для данного минерала, тем не менее, позволяют провести однозначную идентификацию. В приведенном примере спектра пренит и эпидот могут быть идентифицированы по диагностическим поглощениям при 1477 нм и 1550 нм соответственно. Присутствие белой слюды определяется по поглощению около 2200 нм в сочетании с отсутствием поглощения около 1467 нм или 2160 нм (исключая присутствие монтмориллонита или каолинита соответственно). Однако в других случаях белую слюду невозможно однозначно идентифицировать. Иллит (полученный на основе более глубокого поглощения с длиной волны 1900 нм) невозможно спектрально отличить от мусковита в текущем наборе данных, поскольку несколько других фаз демонстрируют поглощения вблизи этого положения. Спектральные смеси монтмориллонита (поглощения при 1467 нм и 2200 нм) или каолинита (поглощения при 2160 нм и 2205 нм) также в лучшем случае затруднят обнаружение мелкозернистой белой слюды (единственное крупное поглощение около 2200 нм), поскольку не будет присутствовать поглощений, характерных только для белой слюды. (*Эффекты спектральных смесей каолинита и мелкозернистой белой слюды подробно рассматриваются в разделе 5.4*).

#### **4.5. Оценка толщины белой слюды.**

Помимо возможности идентификации минералогии, спектральные показатели могут предоставить информацию о физических характеристиках определенных минералов. Белая слюда является относительно слабым поглотителем (т. е. в отличие от более темных минералов, таких как биотит) и прозрачна даже при относительно большой толщине кристаллов (вдоль оси *c*). Измерения коэффициента отражения, выполненные с образцами кристаллов увеличивающейся толщины (увеличивающейся длины оптического пути), дают спектры, которые, по-видимому, соответствуют закону Бера-Ламберта для образцов толщиной до нескольких миллиметров. То есть особенности поглощения становятся все более выраженными

с увеличением толщины образца, вплоть до насыщения полос. С увеличением толщины образца несколько незначительных поглощений становятся все более заметными, например, около 1840 нм или 2125 нм (рис. 3).

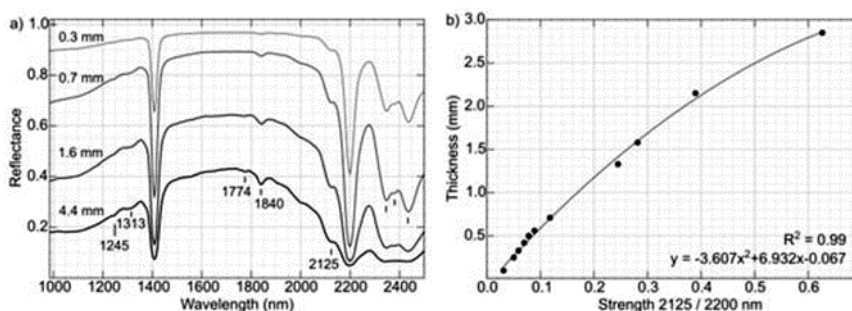


Рис. 3 Изменение спектрального отклика белой слюды в зависимости от толщины.

(а-спектры белой слюды переменной толщины; б-корреляция между производной поглощения 2125 нм и 2200 нм и толщиной).

На рисунке 3а представлены измерения коэффициента отражения от все более толстых листов белой слюды, уложенных плашмя на спектрально-белую панель. С увеличением толщины абсолютная отражательная способность уменьшается во всем спектральном диапазоне, и сильные поглощения быстро становятся насыщенными (например, при 2200 нм). Представляет интерес то, что относительная сила слабого и сильного поглощения дифференциально увеличивается с толщиной образца (т. е. слабое поглощение длиной волны 2125 нм увеличивается по глубине, в то время как сильное поглощение длиной волны 2200 нм становится насыщенным). Таким образом, как показано на рисунке 3б, отношение силы второй производной от поглощения 2125 нм к 2200 нм может быть использовано для оценки толщины белой слюды с точностью до 3 мм. Выше этой толщины зависимость недействительна, поскольку насыщенные поглощения становятся слишком широкими для правильной оценки силы. Однократное измерение, выполненное вдоль осей ab, качественно оказалось похожим на спектр крупнозернистой белой слюды (рис. 3а, 4,4 мм), хотя она кажется толще и имеет более низкую общую отражательную способность.

Хотя количественная взаимосвязь была установлена здесь с использованием слоев белой слюды, отделенных от чистого кристалла и помещенных на белую панель (в лабораторных условиях), аналогичная взаимосвязь, по-видимому, существует в природных образцах, по крайней мере, в качественном смысле. В образцах HVC мелкозернистая белая слюда с матрицей (например, из-за изменения, определяемого как слабая серицитизация) спектрально отличается от крупнозернистых вкрапленников белой слюды (например, тех, которые идентифицированы как средне- и крупнозернистый мусковит), которые были описаны как отдельные зерна в диапазоне от 4 до 1 мм, сростается с кварцем). Предостережение при использовании этого показателя заключается в том, что на него влияют спектральные смеси с минералами, которые

демонстрируют поглощение около 2100-2200 нм. Например, при смешивании с каолинитом образуется явно небольшая толщина слюды, вплоть до нуля в чистом или в основном чистом каолините. Это связано с тем, что поглощение каолинита длиной волны 2160 нм создает точку перегиба около 2120 нм, что вызывает провал во спектрах второй производной, в отличие от ожидаемого пика, что приводит к отрицательной расчетной толщине (здесь показано как ноль). Тем не менее, эффекты спектрального смещения, по-видимому, не вызывали существенных негативных последствий при использовании этого показателя в качественном смысле. В этом исследовании показатель используется для обнаружения присутствия толстой или крупнозернистой белой слюды (т. е. пикселей, показывающих, по-видимому, большую оптическую толщину белой слюды), определяемых здесь как пиксели с отношением 2125 нм к 2200 нм, равным приблизительно 0,16 или выше, что соответствует кажущейся толщине белой слюды 1 мм или более. Для краткости этот показатель называется “размером зерен” белой слюды, хотя этот показатель измеряет оптическую толщину белой слюды, которая не всегда может соответствовать истинному физическому размеру кристаллов белой слюды в природных образцах.

#### ***4.6. Оценка относительного модального содержания минералов.***

Гиперспектральные данные для 755 шлифов из батолита Гишон-Крик были проанализированы для определения относительного модального содержания 12 минералов, перечисленных в таблице 1, а также видимой толщины белой слюды (называемой размером зерен). Спектральные изображения анализируются на основе каждого пикселя, при этом каждый пиксель, возможно, указывает на присутствие одного или нескольких минералов, на основе критериев, представленных на рисунке 2 и таблице 1. Для каждого образца относительное модальное содержание каждого минерала рассчитывается как количество пикселей с данным минералом по отношению к общему количеству пикселей в образце (обратите внимание, что в одном пикселе может быть обнаружено несколько минералов, один минерал или их вообще не обнаружено). То есть относительные модальные содержания, указанные в этом исследовании, отражают только относительные изменения содержания исследуемого минерала в наборе образцов и не являются истинными модальными содержаниями, поскольку они не учитывают все фазы, присутствующие в породе (например, полевой шпат не может быть учтен) (рис. 4).

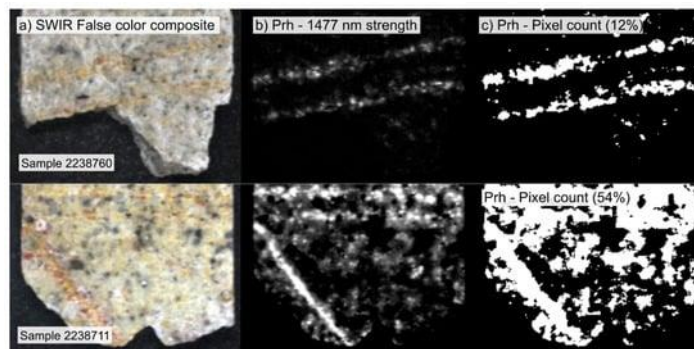


Рис. 4 Пример подсчета содержания в пикселях.

(*a*-изображения в ложноцветном коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR); *b*- гиперспектральное изображение второй производной поглощения 1477 нм – пренит; *c*-количество пикселей - 12% содержат пренит для верхнего образца и 54% для нижнего).

В качестве примера процесса оценки модального содержания, на рисунке 4 показано относительное содержание пренита в двух образцах, соответственно 12% и 54%. Для керна непрерывного бурения указывается значение относительного содержания минералов на каждые 20 см участка керна.

#### **4.7. Оценка изменений для обнаружения минерализованных образцов.**

В большинстве рудных м-ний минералогия измененных и минерализованных образцов отличается от минералогии фоновых, неизмененных и неминерализованных образцов. В Хайленд-Вэлли минерализация в виде сульфидов меди и железа встречается в кварцевых жилах с грубыми отложениями мусковита, и каолинит также распространен в пределах м-ния. Сообщается, что в некоторых районах турмалиновые брекчии связаны с минерализацией и могут быть покрыты эпидотом. Пренит распространен в дистальных зонах изменения пропилита.

Здесь разработана простая оценка изменения, основанная на присутствии или отсутствии минералов, которые, как известно, встречаются при минерализации и которые спектрально обнаруживаются в спектральном диапазоне SWIR. Этот показатель может использоваться для оценки степени изменений в данном образце (или интервале керна бурения) и потенциально может быть использован для отличия минерализованных образцов от неминерализованных. Для каждого образца рассчитывается модальное содержание для каждого из минералов, связанных с минерализацией (сюда входят сульфиды, кварц, крупнозернистый мусковит, каолинит, турмалин и эпидот). Затем рассчитывается оценка изменений путем добавления значения в единицу для каждого минерала с изменениями, присутствующего в образце выше заданного порога, и добавляется оценка в два балла для турмалина и сульфидов, которые встречаются исключительно в минерализованных образцах. Как правило, пороговое значение в 5% пикселей (т. е. модальное содержание) используется для определения присутствия минерала в образце или 0,1% для сульфидов. То есть образец со спектрально оцененным

модальным содержанием (количество пикселей) более 5% как для каолинита, так и для турмалина получил бы оценку изменения в три балла. Пример модальной оценки обилия был показан на рисунке 4. Обратите внимание, что, поскольку каждый минерал идентифицируется независимо, в пределах одного пикселя потенциально могут присутствовать несколько минералов, как показано в спектре смеси на рисунке 2d.

## 5. Результаты.

В отличие от традиционных аналитических методов, которые предоставляют информацию в ограниченных масштабах (т. е. тонкие срезы), спектроскопия изображений может предоставлять минералогическую информацию в широком диапазоне масштабов, от тонких срезов (2 x 4 см) или образцов (10 x 10 см) до целых кернов (м) для платформ зондирования от стен шахты (м) до поверхности (км) дистанционного зондирования. Изображения с высоким разрешением в малых масштабах позволяют охарактеризовать жилы, прожилки и края жил. Таким образом, могут быть распознаны минералогические закономерности, связанные с изменениями, и могут быть разработаны спектральные показатели для идентификации минерализации. Затем эти показатели могут быть применены в крупных масштабах для определения минерализованного интервала в кернах скважин и облегчения каротажа, или для определения потенциальных рудных проявлений в региональном масштабе.

### 5.1. Вариабельность масштаба выборки в фациях Вифсаида и Скина

На рисунке 5 представлены гиперспектральные изображения типичных образцов из м-ния Вэлли и неминерализованного образца в 2-х км к западу от м-ния.

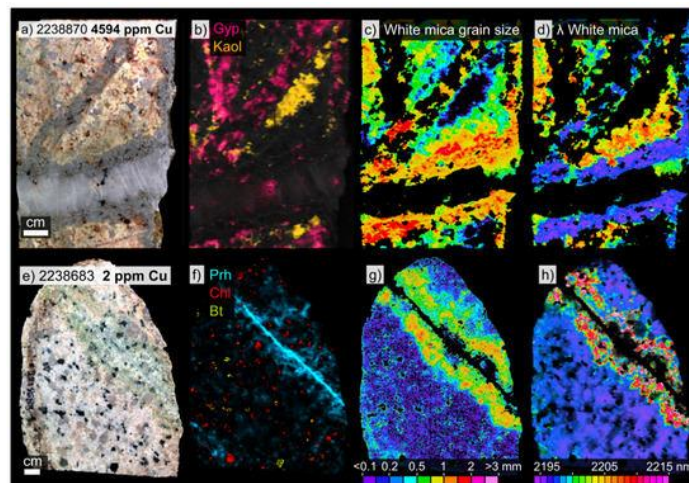


Рис. 5 Гиперспектральные изображения образцов из м-ния Вэлли;

Вверху: (а) минерализованный образец; (b) распределение каолинита (оранжевого) и гипса (розового); (c) спектрально определенный размер зерен белой слюды (цветовая шкала внизу), замаскированный гипсом; (d) положение поглощения 2200 нм  $Al_2-OH$ , характерное для пикселей белой слюды размером более 0,5 мм (цветовая гамма внизу), которая маскирует каолинит.

Внизу: (e) неминерализованный образец; (f) распределение пренита; (g) оспектрально размер зерен белой слюды и; (h) положение поглощения  $Al_2-OH$  с длиной волны 2200 нм для белой слюды.

Граниты и гранодиориты Бетсаиды являются одними из основных источников минерализации в районе Хайленд-Вэлли. На м-ниях минерализация тесно связана с кварцевыми жилами, которые представляют собой крупнозернистые серые отложения мусковита (жилы раннего ореола). Каолинит также может присутствовать во всех этих системах. Всего в Бетсаидской фации и кислых дайках был получен 331 образец и в общей сложности 42 образца из этой группы были минерализованы (содержание меди выше 1000 ppm). В минерализованном образце спектрально обнаруженная минералогия согласуется с описанными типами изменений в фации Бетсаида. Грань кварцевой жилы состоит из крупнозернистой белой слюды, а в измененной основной массе присутствует каолинит (рис. 5б). Серый мусковит, образующий обрамление минерализованных жил (рис. 5с) с поглощением  $Al_2-OH$  около 2195 нм. Непосредственно рядом с серым мусковитом находится крупнозернистая зелено-белая слюда фенгитового происхождения (рис. 5d) с поглощением около 2210 нм, хотя в других минерализованных образцах эта фенгитовая белая слюда может отсутствовать. Образец на рисунке 5d был отфильтрован для удаления помех от гипса и каолинита, показывая только пиксели с крупнозернистой белой слюдой с отношением поглощения от 2125 нм до 2200 нм выше 0,1 (что соответствует толщине более 0,5 мм). Каолинит не обладает поглощением вблизи 2125 нм, что приводит к нулевому коэффициенту. Маскирующие пиксели с коэффициентом ниже 0,1 исключают как мелкозернистую белую слюду, так и каолинит.

Спектрально идентифицированная минералогия типичного неминерализованного (но измененного) образца согласуется с областью изменения пропилита, богатой пренитом. На рисунке 5f показаны спектральные изображения, подчеркивающие наличие пренитовой жилы с кромкой, состоящей из небольшого количества пренита и крупнозернистой (рис. 5g) фенгитовой белой слюды (рис. 5h) с поглощением около 2210 нм. В большинстве образцов эта крупнозернистая белая слюда находится в непосредственной близости от жил (от 1 до 5 см). Во многих случаях минералогический фон со слабыми изменениями или без изменений обнаруживается вдали от жил (например, в нижней левой части неминерализованного образца на рисунке 5). Здесь это мелкозернистая белая слюда (мусковит и/или иллит) ± монтмориллонит, которые вместе всегда имеют низкую длину волны поглощения, 2195 нм или ниже. Во многих случаях наименее измененные породы повсюду содержат незначительное количество пренита (рис. 5f нижняя левая часть), или, альтернативно, иногда в них может преобладать монтмориллонит или, реже, пумпеллит. Жилы эпидота иногда присутствуют в зоне пропиловых изменений, но подчинены жилам и прожилкам пренита.

Фация Скина представлена в общей сложности 118 образцами, 15 из которых содержат сульфидную минерализацию. Эта фация является основной вмещающей породой для Лорнекса и части м-ния Вифлеем, а также всего м-ния Хаймонт. Минералогия пород Скинской фации схожа с минералогией Вифсаиды, с существенным отличием в том, что повсеместно распространены жилы или прожилки эпидота, часто с участками, состоящими из пренита, с сопутствующей крупнозернистой белой фенгитовой слюдой (длинноволновая, около 2210 нм) или без нее.

### 5.2. Вариабельность масштаба выборки в вифлеемской и других фациях.

М-ние Вифлеем и более 160 дистальных проявлений батолита Гишон-Крик не были в центре внимания проекта NSERC-СМІС "Следы", но, тем не менее, несколько образцов были собраны в рамках исследований дистального следа изменения, и они кратко описаны здесь. Литофациальные породы Вифлеема сгруппированы с двумя другими фациями, образующими внешние границы батолита Гишон-Крик (фации Хайленд-Вэлли и Бордер), и включают образцы из м-ния Вифлеем и многочисленные периферийные проявления Cu. Из 306 образцов из этих литофаций 11 были минерализованы (здесь определено как >1000 ppm Cu), и, хотя большинство было взято из дистальных отложений, все они демонстрировали в целом схожие закономерности изменений.

На рисунке 6 (вверху) представлен типичный минерализованный образец из субфации Гишон фации Хайленд-Вэлли. На рисунке 6 (внизу) представлен типичный неминерализованный (но частично измененный) образец из вифлеемской фации, расположенный в 6 км к западу от карьера Лорнекс. Этот образец соответствует зоне изменения пропилита.

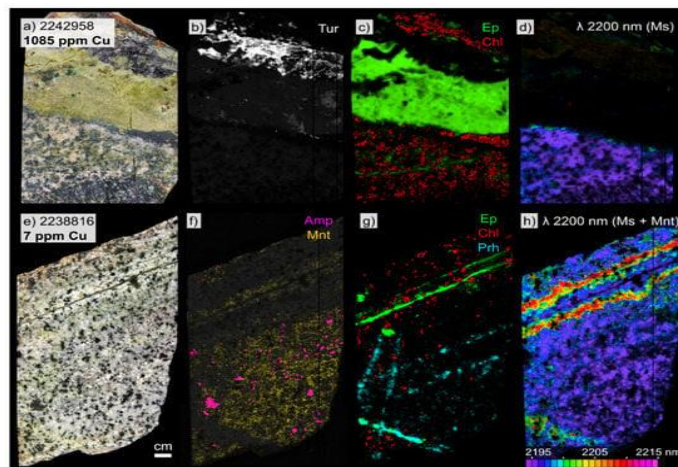


Рис. 6 гиперспектральные изображения образцов из м-ния Вифсаид.

Вверху: (a) минерализованный образец из гишонской фации; (b) распределение турмалина; (c) распределение эпидота (зеленого) и хлорита (красного) и (d) положение полосы поглощения 2200 нм.

Внизу: (e) неминерализованный образец в 6 км от карьера, с содержанием 7 ppm меди; (f) распределение монтмориллонита (желтый); (g) распределение хлорита (красный), эпидота (зеленый), пренита (синий) и амфибола (фиолетовый) и (h) поглощение положение элемента  $Al_2O_3$  с длиной волны 2200 нм для белой слюды, смеси белой слюды и монтмориллонита.

На Вифлеемском м-нии (и в породах фации Вифлеем или Хайленд-Вэлли) минерализация протекает в присутствии турмалиновых жил (или брекчии), часто связанных со значительным содержанием эпидота (рис. 6, вверху), но в целом лишенных крупнозернистого серого мусковита (богатого Al), который характерен для минерализации вифсаидской и скинской фаций. В прожилках хлорит присутствует в изобилии и уступает место амфиболу в неизменных частях образцов (рис. 6f, g). Матрица кислых минералов состоит из мелкозернистого мусковита с высоким содержанием Al (поглощение около 2195 нм, рис. 6d), как правило, без монтмориллонита (отсутствие поглощения около 1467 нм). В неминерализованных (но частично измененных) образцах (рис. 6, внизу) широко распространены мелкие прожилки эпидота, которые представляют собой крошки размером от сантиметра, которые могут содержать белую фенгитовую слюду средней или крупнозернистой (от 0,2 до 0,5 мм) плотности (длинные позиции поглощения, около 2215 нм). Однако во многих образцах фенгитовые изменения слабые и, по-видимому, либо не проявились, либо были частично или полностью нанесены коротковолновой (2195 нм) белой слюдой, иллитом и/или монтмориллонитом (рис. 6f). Пренит часто встречается в наименее измененных образцах (он присутствует более чем в половине образцов этой группы) и может по-разному проявляться в виде надпечатывающих прожилок, в виде реликтовых прожилок, наложенных (поперечных) прожилками эпидота, в виде краев жил или в виде вкраплений. Таким образом, общая картина изменений на Вифлеемском м-нии варьируется от прожилок турмалина и эпидота с проксимальными остатками хлорита ( $\pm$  фенгит) до более дистальных остатков пренита ( $\pm$  монтмориллонит) или изменения основной массы и, наконец, до неизменного протолитового амфибола.

### **5.3. Химический состав минералов эпидота.**

Минералы группы эпидота являются важными минералами изменений медно-порфировых систем и являются одним из наиболее заметных индикаторов изменений, часто имеют легко узнаваемый фиштакково-зеленый цвет. Эпидот распространен повсеместно в НВС, особенно в Вифлееме и других литофациях. Что касается нескольких других минералов, исследованных с помощью гиперспектральной визуализации, минеральный химический состав твердого раствора эпидот-клинозоизит можно оценить по положению характеристического поглощения вблизи 1550 нм. Эндмембер эпидота с  $X_{Fe} = (Fe^{3+} / (Fe^{3+} + Al)) \approx 0,33$  имеет основное поглощение около 1542 нм, в то время как эндмембер клинозоизита ( $X_{Fe} = 0$ ) имеет основное поглощение около 1558 нм, и изменения этого положения были зарегистрированы в пределах различных зон изменений. Этот показатель был исследован как потенциальный вектор минерализации, с

неубедительными результатами. Было отмечено, что изменчивость положения поглощения (т.е. изменения химического состава минералов) происходит в пределах отдельных жил, и жилы в пределах данного образца могут иметь заметно отличающийся состав. Обе закономерности проиллюстрированы на рисунке 7.

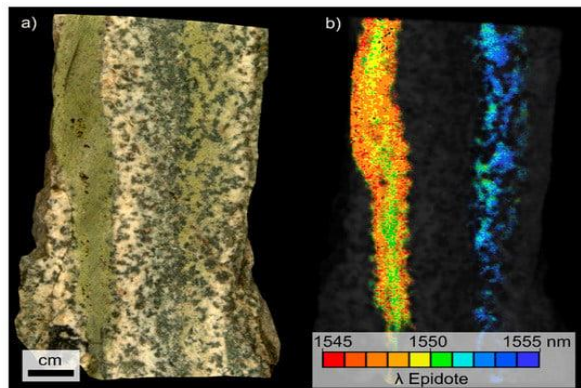


Рис. 7 (а) неминерализованный образец (21 ppm Cu) из зоны изменений пропилита в 3 км от м-ния Вифлеем; (б) Гиперспектральные изображения поглощения эпидота длиной волны 1550 нм.

Здесь левая эпидотовая жилка показывает ядро с поглощением около 1551 нм (зеленые цвета), переходящее в 1545 нм у краев жилы (красные цвета). Вторая жилка, с правой стороны образца, показывает основное положение поглощения между 1552 и 1555 нм (синие цвета). Из-за потенциальной изменчивости химического состава эпидота в любом данном образце, на 755 образцах не было выявлено закономерностей систематических изменений (их невозможно обнаружить с помощью гиперспектральной визуализации SWIR). Аналогичным образом, не было обнаружено систематических изменений в относительном модальном содержании эпидота вокруг отложений.

#### **5.4. Оценка изменений и обнаружение минерализованных образцов.**

На основе обнаруживаемых изменений может быть определен показатель спектральных изменений для оценки степени изменений в данном образце (методология была описана в разделе 3.7). Этот показатель основан на присутствии или отсутствии заданного набора минералов в каждом образце, где присутствие минерала выше (или ниже) заданного модального порога обилия дает оценку в один балл (или два в определенных случаях). В таблице 2 представлен набор минералов, которые могут служить для определения степени изменений в каждой из групп пород в батолите Гишон-Крик, а также могут использоваться для различения минерализованных и неминерализованных образцов, определяемых пороговым значением 1000 ppm Cu.

Минералогические параметры, используемые для оценки изменения спектра.

| Group                                    | Qz<br>>5% | Kaol.<br>>5% | Coarse Ms<br>>5% | Prh<br><5% | Ep<br><0.5% | Ep<br>>20% | Tur.<br>>5% | Sulf.<br>>0.1% |
|--|-----------|--------------|------------------|------------|-------------|------------|-------------|----------------|
| Bethsaida + Dykes<br>(N = 331)           | 1         | 1            | 1                | 1          |             |            |             |                |
| Skeena<br>(N = 118)                      |           |              | 1                | 1          | 1           | 1          |             |                |
| Bethlehem and more<br>mafic<br>(N = 306) |           |              |                  | 1          | 1           | 1          | 2           | 2              |
| Global<br>(N = 755)                      | 1         | 1            | 1                | 1          | 1           | 1          | 2           | 2              |

\* For each mineral, the modal percentage shown is the cut-off above (or below) which a sample will obtain the indicated score. Qz = quartz, Kaol = kaolinite, Coarse Ms = coarse grained white mica, Prh = prehnite, Ep = epidote, Tur. = tourmaline, Sulf. = sulfides.

Для Вифсаидской фации и связанных с ней кислых даек присутствие более 5% кварца, каолинита или крупнозернистого мусковита (с использованием порога в 1 мм) или присутствие менее 5% пренита в данном образце дает значение единицы к баллу изменения. Для разновидности Скина наличие более 5% крупнозернистого мусковита, менее 5% пренита и менее 0,5% или более 20% эпидота дает значение, равное единице. Для вифлеемской и более мафитовых фаций менее 5% пренита, менее 0,5% или более 20% эпидота каждое дает значение, равное единице, а присутствие более 5% турмалина или более 0,1% сульфидов каждое дает значение, равное двум. Точный порог обилия не является критичным для хороших показателей, но может служить для точной настройки результатов.

Точечная диаграмма между оценкой изменения (полученная с использованием глобальной метрики, определенной в табл. 2) и концентрацией Cu для 755 образцов представлена на рисунке 8.

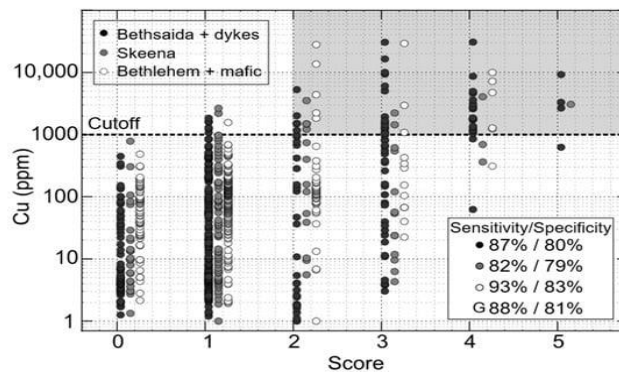


Рис. 8 Корреляция между концентрацией Cu и показателем изменения спектра для 755 шлифов. Образцы, набравшие 2 балла или выше, считаются минерализованными (>1000 ppm Cu). Результаты классификации (чувствительность/специфичность) перечислены в правом нижнем углу для каждой группы, а также для всего набора данных (G).

Образцы с оценкой два или выше считаются минерализованными. То есть образцы с двумя минералами выше (или ниже) установленного порогового значения классифицируются как минерализованные, а образцы с турмалином или сульфидами (каждый из которых дает двойную оценку) всегда считаются минерализованными. Здесь чувствительность относится к

истинно положительному показателю (т.е. проценту минерализованных образцов, правильно идентифицированных как таковые), а специфичность относится к истинно отрицательному показателю (т.е. проценту неминерализованных образцов, идентифицированных как таковые). Например, для Вифсаиды и связанных с ней кислых даек 87% минерализованных образцов получают оценку изменений на уровне двух или выше, а 80% неминерализованных образцов получают оценку ноль или единица. Изменяя пороговые значения содержания, представленные в таблице 2, можно легко регулировать результирующую чувствительность или специфичность. Например, изменение порога для пренита с 5% до 0,5% снижает чувствительность в бетсаидской фации с 87% до 85%, но увеличивает специфичность с 80% до 85%.

Как правило, увеличение показателей спектральных изменений связано с более высокими концентрациями Си. Однако определить точное содержание Си в данном образце невозможно, поскольку концентрации Си могут варьироваться на порядки в пределах заданного значения оценки. Например, образцы с нулевой оценкой могут иметь содержание Си от 1 до 1000 ppm, в то время как образцы с пятью оценками изменения спектра могут иметь концентрацию Си от 500 до 10000 ppm.

### **5.5. Минералогические закономерности в масштабах керна.**

Гиперспектральная визуализация позволяет анализировать большие образцы (например, керны буровых установок), которые могут выявить минералогические структуры в масштабе от дециметра до метра, которые в противном случае не были бы обнаружены в меньших масштабах. Это также может дать представление о непрерывности (или прерывистости) гидротермальных изменений вокруг минерализованных интервалов. Минералогические закономерности, ранее идентифицированные по ручным образцам, и результирующая оценка спектральных изменений используются для определения потенциально минерализованных интервалов непосредственно на 400 м непрерывного керна.

На рисунке 9 представлены сводные графики скважины V15-021, пробуренной в гранодиорите Бетсаида, в 900 м к юго-западу от м-ния Вэлли.

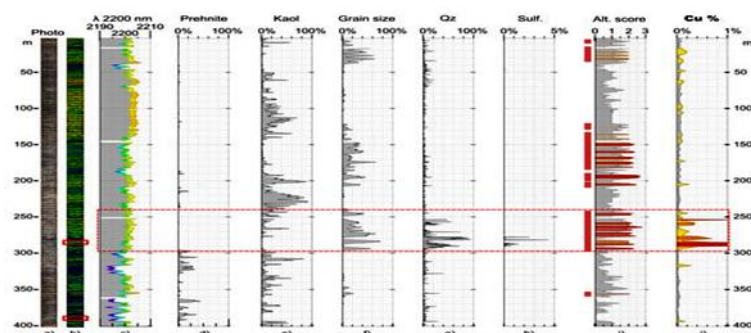


Рис. 9 Скважинные данные с 400-метрового керна V15-021.

Керн пересекает как минерализованные, так и неминерализованные интервалы. Основная рудная зона выделена красным пунктиром. В пределах этой конкретной скважины наиболее очевидным изменением минералогии почти на всем минерализованном интервале является наличие интенсивных кварцевых прожилков. Однако интенсивные кварцевые прожилки не всегда указывают на минерализацию в HVC, поскольку известно, что на отдельных участках м-ния встречаются зоны, богатые кварцем (бесплодное ядро).

С другой стороны, крупнозернистая белая слюда (обычно толщиной более 1 мм) почти всегда указывает на минерализацию и в изобилии находится внутри кварцевых жил и непосредственно вокруг них. Низкие содержания каолинита также могут встречаться в пределах минерализованной зоны, но наибольшие количества залегают на расстоянии нескольких сотен метров непосредственно вокруг основной рудной зоны. Дистально, где изменения каолинита менее интенсивны, спорадически проявляются прожилки пренита. Вместе эти минералы определяют оценку спектральных изменений (табл. 2). Эффективность этого показателя можно оценить по скважинным данным, где все интервалы с содержанием меди выше 0,3% (между 250 и 300 м), а большинство интервалов с содержанием меди выше 0,1% показывают оценку на уровне двух баллов или выше. Хотя в данном конкретном керне оценка спектральных изменений, по-видимому, особенно зависит от размера зерен белой слюды, другие минералы, определяющие этот показатель, важны для получения адекватных результатов классификации в других образцах HVC.

На рисунке 10 представлены изображения крупным планом двух керновых блоков, демонстрирующих типичные минералогические закономерности как в сильно минерализованном интервале (слева 0,78% Cu), так и в слабо измененном, но безрудном интервале (справа 0,03% Cu) на расстоянии 100 м от минерализованной зоны.

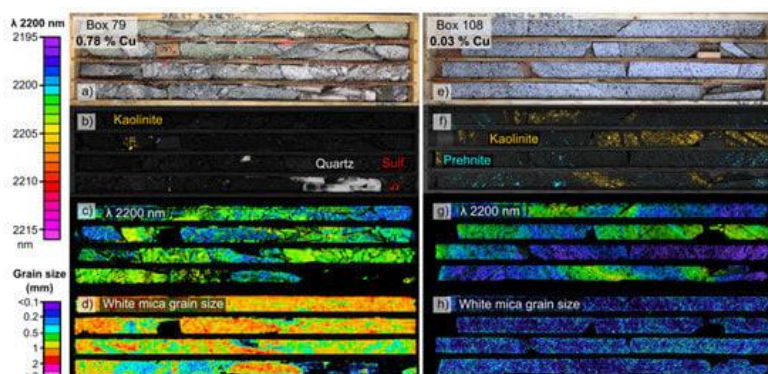


Рис. 10 Слева минерализованный интервал:  
*a* - цветная фотография. Гиперспектральные изображения: *b* - каолинит (оранжевый), кварц (белый) и сульфиды (красный);  
*c* - элементы поглощения 2200 нм; *d* - размеры зерен белой слюды.  
 Справа: безрудный интервал:  
*e* - цветная фотография. Гиперспектральные изображения: *f* - каолинит (оранжевый) и пренита (синий);  
*g* - элементы поглощения 2200 нм; *h* - размеры зерен белой слюды.

Минералогические изменения, наблюдаемые на протяжении нескольких сотен метров керна, окружающего рудную зону, повторяются здесь в меньших пространственных масштабах. Сульфидная жила (3 см) присутствует внутри или непосредственно рядом с широкой зоной, богатой кварцевыми прожилками (30 см), которая затем окружена крупнозернистой белой слюдой (зона длиной 3 м) мусковитового состава (низкая длина волны, 2195 нм в пределах самых крупных зерен. Каолинит может присутствовать повсюду и может мешать оценке химического состава белой слюды. Пренит и каолинит встречаются спорадически в безрудных интервалах в виде жил различной ориентации с гранями от сантиметра до дециметра. Поскольку жилы обычно расположены на расстоянии от 10 до 50 см друг от друга, их невозможно полностью зафиксировать в масштабе образца одной руки (10x10 см). В переходных областях между жилами каолинита и фоном из белой слюды (т.е. в ореолах жил) очевидно промежуточные положения поглощения 2200 нм (все желто-зелено-синие цвета, от 2204 до 2196 нм), вероятно, вызваны смещением поглощения 2195 нм фоновой белой слюды с высоким содержанием Al и поглощения 2205 нм каолинита (все области выше 2195 нм).

### 5.6. Минералогические закономерности регионального масштаба.

Были исследованы 755 шлифов на площади 20 x 40 км района Хайленд-Вэлли, и охватывают большую часть батолита Гишон-Крик. Региональное картирование минералогии может спрогнозировать м-ния.

На рисунке 11 представлены геохимические и спектральные данные регионального масштаба для всех образцов.

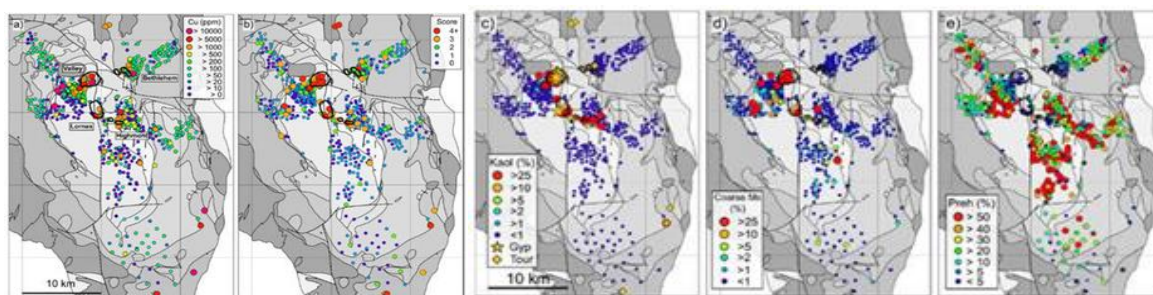


Рис. 11 Региональная карта батолита Гишон-Крик с данными 755 образцов.

(a - концентрация меди (в промилле); b - оценка спектральных изменений; c - каолинит с присутствием гипса и турмалина (>5%); d - крупнозернистая белая слюда (>1 мм) и e - пренит.

Большинство образцов с содержанием меди выше 1000 ppm находятся в пределах карьеров (Вэлли, Лорнекс, Вифлеем и Хаймонт) или вблизи них, но несколько небольших проявлений также встречаются на периферии батолита. По отдельности несколько минералов указывают на близость к минерализации. Гипс встречается исключительно в минерализованных областях в пределах карьеров, в то время как турмалин встречается с минерализацией в отдельных проявлениях. Каолинит может встречаться на расстоянии до 2 км от карьеров, а

крупнозернистая белая слюда (толщиной более 1 мм, определяемая по спектральной метрике) может быть обнаружена на расстоянии до 4 км от м-ний. В карьерах крупнозернистая белая слюда имеет мусковитовый (высоколегированный) состав, с поглощением около 2195 нм (это соответствует серому мусковиту). Пренит является наиболее удаленным спектрально обнаруживаемым измененным минералом, определяющим кольцевую зону изменений, простирающуюся от 4 до 8 км вокруг м-ний.

Во многих случаях прожилки пренита представляют собой участки крупнозернистой фенгитовой белой слюды зеленого цвета (с низким содержанием Al, с длинными длинами волн поглощения около 2215 нм), в то время как фоновая белая слюда (которая может содержать иллит и/или монтмориллонит) всегда имеет небольшие размеры зерен (менее 0,2 мм) и низкие длины волн поглощения (около 2195 нм). Эти минералогические параметры определяют оценку спектральных изменений (как определено в табл. 2 и рис. 8). Образцы с высокими показателями спектральных изменений пространственно связаны с минерализованными зонами, как внутри карьеров, так и в отдельных проявлениях. Образцы также, как правило, показывают все более высокие показатели по мере приближения к минерализации (например, непосредственно к юго-западу от карьера Вэлли, от нуля на расстоянии 5 км до четырех баллов внутри карьера). Таким образом, эта оценка может служить вектором минерализации в региональном масштабе.

### ***5.7. Вариабельность в региональном масштабе для объектов с 2200 нм.***

Точное положение полосы поглощения белой слюды длиной волны 2200 нм зависит от химического состава ее минералов и, следовательно, может быть использовано для оценки содержания в ней Al. Положения поглощения варьируются от 2190 нм для богатой Al (мусковитовой) белой слюды до 2215 нм для белой слюды с низким содержанием Al (фенгитовой, с заменой Al на Fe или Mg). Во многих гидротермальных м-ниях белая слюда часто имеет химический состав, отличный от фонового, и поэтому может служить эффективным фактором минерализации. Использование этого показателя было исследовано на многочисленных м-ниях, например, сообщалось, что белая слюда в Cu-Au-Mo порфире является мусковитовой (низкочастотной) вблизи минерализации. Сообщается, что в архейских м-ниях золота белая слюда либо мусковитовая (архейское м-ние золота Санрайз-Дам), либо фенгитовая (канадское м-ние золота Кановна-Белль) вблизи минерализации. Другие факторы, такие как состав протолита, степень метаморфизма или спектральные помехи, также могут влиять на видимые положения поглощения белой слюды, и их необходимо принимать во внимание. Например, вариации поглощения в 2200 нм использовались для картирования региональных градиентов метаморфизма, где все более богатая Al (мусковитовая, с более короткими длинами волн) белая слюда указывала на более высокие степени метаморфизма.

При NVC спектральные помехи являются проблемами. Несколько минералов демонстрируют потенциально мешающее поглощение вблизи 2200 нм, включая каолинит (2207 нм) и турмалин (2208 нм). В результате картирование в региональном масштабе среднего положения 2200 нм для каждого образца может дать ошибочные результаты, если присутствие этих минералов не определено. Данные, на рисунке 12, иллюстрируют влияние спектральных помех на поглощение белой слюды длиной волны 2200 нм.

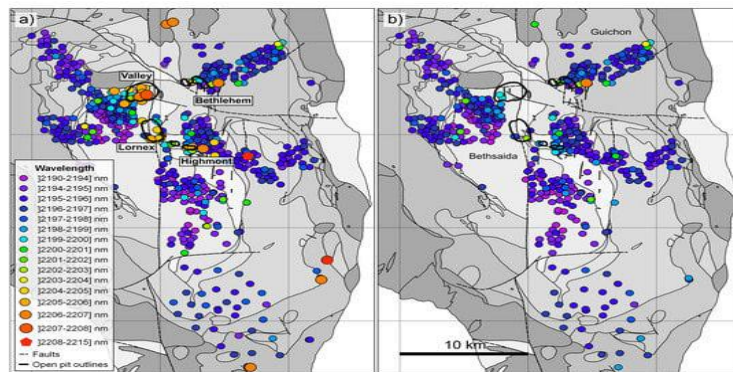


Рис. 12 Региональная карта батолита Гишон-Крик, поглощения 2200 нм для каждого из 755 образцов (а - без минералогической фильтрации и б - образцы без каолинита или турмалина).

При NVC этот видимый региональный градиент в основном вызван интерференцией сосуществующего каолинита, а не изменениями химического состава белой слюды. Аналогичным образом, образцы из отдельных проявлений вблизи периферии батолита демонстрируют поглощение около 2208 нм, вызванное помехами от турмалина. На рисунке 12b показан тот же набор данных, но теперь отфильтрованный для удаления образцов, содержащих больше 0.1% каолинита (по количеству пикселей) или те, которые содержат более 5% турмалина. В этом отфильтрованном наборе данных большинство образцов из карьера были удалены, и четкого градиента в сторону м-ния не видно, хотя несколько образцов вблизи карьеров имеют поглощение около 2199-2200 нм. Это, вероятно, связано со следовыми количествами каолинита, которые невозможно достоверно обнаружить. Еще одно слабое изменение в составе белой слюды в этом отфильтрованном наборе данных, по-видимому, связано с составом протолитов. В неизменном виде образцы фации Вифсаиды показывают, белой слюды (мусковит±Иллит±монтмориллонит) с поглощения вблизи 2193 Нм, в то время как в неизменном виде образцы из более дистальных и мафит Guichon фации показывают чуть более phengitic композиции, с поглощений рядом 2196 нм. По этим причинам, хотя положение полосы поглощения 2200 нм может быть очень полезным инструментом для картирования региональных градиентов состава, при интерпретации результатов необходимо учитывать возможные спектральные помехи, особенно если они получены из гиперспектральных измерений с низким пространственным разрешением (например,

аэроданные со скоростью 1 м/пиксель или данные точечного спектрометра, не содержащие изображений).

## **6. Обсуждение**

### **6.1. Минералогическая изменчивость в районе долины Хайленд**

По меньшей мере 10 спектрально активных минералов и два спектрально неактивных (но идентифицируемых) минерала были обнаружены в образцах из района Хайленд-Вэлли. Другие минералы, идентифицированные в нескольких образцах, включают малахит, карбонаты и биотит. Однако эти минералы трудно обнаружить в SWIR в текущем наборе образцов либо из-за низкого модального содержания (например, малахита или нехлоритизированного свежего биотита), либо из-за спектрального смещения (например, для карбонатов поглощение 2330 нм трудно обнаружить в присутствии ряда спектрально активных минералов), либо из-за низкого отношения сигнал/шум из-за темной природы минералов (например, крупных кристаллов). Минералы, дающие неоднозначный, слабый или мешающий спектральный отклик, могут быть недооценены из-за их относительного содержания, и спектрально неактивные минералы, по большей части, не могут быть обнаружены (например, полевой шпат). Использование гиперспектральных приборов в средневолновом инфракрасном диапазоне (MWIR) или длинноволновом инфракрасном диапазоне (LWIR) может лучше подойти для исследования некоторых из этих минералов. Карбонаты, например, демонстрируют несколько поглощений в диапазоне от 3300 до 4000 нм, которые могут уменьшить проблемы спектральных помех, наблюдаемых в SWIR. Аналогичным образом, полевые шпаты могут быть идентифицированы и охарактеризованы в LWIR, что может предоставить дополнительные сведения о степени изменения калийных (К-полевой шпат) или натриево-кальциевых (альбит) минералов. Интеграция этих дополнительных спектральных диапазонов, вероятно, принесет пользу гиперспектральным исследованиям для получения всестороннего понимания минералогических изменений на рудных месторождениях.

С учетом этих ограничений гиперспектральная визуализация proximal SWIR, тем не менее, предоставляет новую информацию об измененной минералогии в районе Хайленд-Вэлли. Наиболее заметным изменением, связанным с гидротермальными изменениями на м-ниях Вэлли и Лорнекс, является наличие крупнозернистой белой слюды, определяемой по соотношению ее поглощений 2125 и 2200 нм. В образцах было обнаружено, что крупнозернистая белая слюда ограничена несколькими сантиметрами вокруг минерализованных жил (рис. 5c) и в целом является мусковитовой (2195 нм) на м-нии (рис. 5d) и фенгитовой (2215 нм) на расстоянии от м-ния (рис. 5h). Однако непрерывные снимки зерна

при бурении показали, что зона крупнозернистой белой слюды может залежать на протяжении нескольких метров внутри и вокруг сильно минерализованных интервалов (рис. 10d). Каолинит, если он будет обнаружен во время региональной разведки, может указывать на потенциальную минерализацию. Однако в масштабах м-ния скважинные снимки показывают, что наибольшее содержание каолинита встречается непосредственно рядом с сильно минерализованными интервалами, но не внутри них (рис. 9e). Поэтому при использовании интерпретированной минералогии необходимо учитывать масштаб наблюдений. В контексте региональных поисков каолинит был бы целевым минералом, поскольку его присутствие может указывать на близлежащее (менее чем в нескольких сотнях метров) м-ние. Однако в производственных условиях наличие большого количества каолинита может указывать на то, что минерализованная цель была упущена. Пренит встречается повсеместно в образцах, взятых на расстоянии от 4 до 8 км от м-ний, и его содержание резко снизилось в образцах вблизи (<4 км) и внутри м-ний. Пренит является наиболее удаленным спектрально обнаруживаемым измененным минералом на NVC (до 8 км). Из-за его отличительной спектральной характеристики (ни один другой распространенный минерал не демонстрирует поглощение вблизи 1477 нм), он легко идентифицируется в минеральных смесях и, следовательно, может служить эффективным дистальным индикатором минерализации в региональных масштабах.

### ***6.2. Оценка изменения спектра и его последствий.***

Помимо сульфидов, минералы, обычно связанные с минерализацией м-ний Вэлли, Лорнекс и Хаймонт, включают кварц, крупнозернистую белую слюду и каолинит. На Вифлеемском м-нии турмалин и эпидот в большом количестве также являются распространенными минералами изменений. Пренит и эпидот встречаются в дистальном ореоле изменений во всех случаях и, как ожидается, не будут встречаться в минерализованных образцах. Вместе эти семь ключевых минералов могут служить для получения оценки спектральных изменений, которая действительна для всего батолита Гишон-Крик. Несколько других минералов также могут иметь положительную или отрицательную корреляцию с минерализацией и могут служить для улучшения оценки спектральных изменений. Например, гипс встречается исключительно в отложениях Вэлли и Лорнекс (рис. 11c), и его присутствие может указывать на потенциально минерализованные образцы. Амфибол, с другой стороны, является первичным магматическим минералом и обычно хлоризирован в измененных зонах (рис. 6e,f). Следовательно, его присутствие указывает на неизменные образцы (т. е. значение единицы может быть вычтено из показателя изменения спектра для образцов, содержащих амфибол).

Хотя дополнительные минералы могли бы повысить точность оценки спектральных изменений на данном участке м-ния, предполагаемая цель представленной здесь метрики - служить доказательством концепции, которая может быть легко реализована и направлена на упрощение. Этот показатель может быть использован, например, в качестве инструмента поисков при отборе проб в региональном масштабе (рис. 11б), или потенциально может быть использован для характеристики ресурсов как часть набора измерений при сортировке руды (например, с помощью гиперспектральной камеры, установленной на конвейерной ленте, транспортирующей сыпучую руду). Для этого потребуется, чтобы показатель был недорогим с точки зрения вычислений и хорошо выполнялся для всех образцов батолита Гишон-Крик (а не ограничивался подмножеством образцов). По этим причинам минимальный набор минералов или спектральных параметров предпочтительнее сложного набора спектральных показателей. Часто используемое положение элемента поглощения 2200 нм (представляющего химический состав белой слюды) не было включено в текущую оценку изменения спектра, поскольку это потребовало бы интерполяции спектральных данных, что потребовало бы больших вычислительных затрат и может оказаться трудным в реализации. Скорее, предлагаемая метрика основана исключительно на присутствии или отсутствии набора ключевых минералов, которые встречаются в измененных зонах, все из которых потенциально могут быть идентифицированы с помощью простых в вычислительном отношении методов, таких как соотношение полос. Важно отметить, что метрика также не опирается на сложные, полученные статистическим путем, параметры. Таким образом, при необходимости метрику можно легко изменить с учетом геологических знаний (например, на определенных участках данного м-ния другой набор минералов может работать лучше, чем представленные здесь).

С учетом этих соображений оценка спектральных изменений адекватна для всего набора образцов. Глобальная метрика, использующая все минералы, перечисленные в таблице 2, позволяет обнаружить 88% минерализованных образцов и 81% безрудных образцов, в общей сложности на 755 шлифах (независимо от литофации). Неправильно идентифицированные минерализованные образцы обычно содержат низкое содержание Cu, около предельного уровня 1000 ppm Cu. Из общего количества 72 минерализованных образцов 63 были идентифицированы правильно, а девять были ошибочно идентифицированы как неминерализованные. В семи из них содержалось от 1045 до 1827 ppm Cu, а в двух - от 2191 до 2651 ppm Cu, все ниже уровня оценки запасов в 0,3% Cu по HVC. Как правило, образцы с более высоким показателем изменения спектра содержат большие концентрации Cu (рис. 8). Однако, поскольку минерализация может быть сосредоточена в нескольких жилах, в то время как участки изменений, как правило, более обширны, невозможно определить точную

концентрацию Cu для любого данного образца на основе только минералогии изменений (например, в породах Бетсаиды с оценкой пять может содержаться Cu от 500 до >10 000 ppm).

### **6.3. Прожилки кварца и изменения в непрерывном керне.**

В представленном здесь керне непрерывного бурения было обнаружено, что спектрально оцененное содержание кварца (рис. 9г; и сопутствующих сульфидов на рис. 9h) тесно коррелирует с анализируемыми содержаниями Cu. Однако присутствие только кварца не обязательно является показателем минерализации, поскольку известно, что кварцевые жилы в центральных частях м-ния безрудны. Следовательно, вероятно, что корреляция между обнаруженным спектрально содержанием кварца и минерализацией действительно только на определенных участках м-ний, но не во всех м-ниях. Тем не менее, поскольку в этом исследовании не отбирались образцы безрудного керна, он все же может иметь спектрально обнаруживаемые отличия от кварца из минерализованных зон. В безрудном кварце может, например, отсутствовать сопутствующие спектрально обнаруживаемые сульфиды, или может быть меньше флюидных включений, что приводит к более слабому поглощению воды, или может быть связано с минералами, которые не имеют тесной связи с минерализацией (например, пренитом).

Представленная здесь оценка спектральных изменений, учитывающая несколько минералов, указывающих на изменения, в целом является более всеобъемлющей оценкой минерализации по всем м-ниям в районе HVC и точно определяет изменения и потенциальную минерализацию как в образцах, так и в керне скважин. Хотя в конкретном разрезе керна, показанном в этом исследовании, оценка спектральных изменений, по-видимому, в основном зависит от присутствия крупнозернистой белой слюды, другие минералы, тем не менее, необходимы для получения надежного показателя по всем образцам.

### **6.4. Вмешательство в оценку химического состава белой слюды.**

Хотя гиперспектральная визуализация с высоким разрешением позволяет идентифицировать минералогия на небольших участках (например, 1 мм<sup>2</sup>), что сводит к минимуму спектральное смешение, часто встречающееся при точечных измерениях (охватывая, например, 1 см<sup>2</sup>), некоторые минералы встречаются в виде плотных смесей (в микронных масштабах) и, при представлении перекрывающихся поглощений, создают трудности при их анализе. Часто встречающаяся смесь, которую спектрально трудно исследовать, включает Al-содержащие филлосиликаты мусковит (т.е. белую слюду с заполненностью межслоя  $\approx 1$  apfu), иллит (т.е. с заполненностью межслоя  $< 0,85$  apfu), смектиты (т.е. монтмориллонит) и минералы группы каолина. В этом исследовании спектры фоновой минералогии в неизмененных образцах почти всегда показывают поглощение около или ниже

2195 нм, что указывает на богатую Al белую слюду, но часто показывают неодинаково выраженное поглощение 1467 нм и  $\approx 1900$  нм, что может указывать соответственно на сосуществование монтмориллонита и/или иллита. Поскольку поглощение монтмориллонита на длине волны 1467 нм относительно слабое и перекрывается с поглощением свободной воды на длине волны  $\sim 1430$  нм (например, жидких включений в сосуществующих зернах кварца), монтмориллонит может быть надежно обнаружен только в том случае, если присутствует в относительно больших количествах. По этой причине, хотя фоновая, неизменная алюмосиликатная минералогия называется мелкозернистой белой слюдой, это всегда возможная смесь богатого Al (низкая длина волны,  $\approx 2195$  нм) мусковита, иллита и/или монтмориллонита.

Присутствие каолинита также проблематично для оценки химического состава минералов белой слюды (мусковита), поскольку поглощение каолинита на длине волны 2207 нм полностью перекрывает поглощение  $Al_2-OH$  белой слюды вблизи 2200 нм и перекрывает его. Каолинит может быть обнаружен по наличию уникального поглощения  $\approx 2160$  нм, но, как и поглощение монтмориллонита с длиной волны 1467 нм, оно относительно слабое, и его может быть трудно обнаружить, когда каолинит встречается в небольших количествах. Поглощение каолинита на длине волны 2207 нм кажется намного более сильным, и при сосуществовании с белой слюдой влияет на общее расчетное положение  $Al_2-OH$  в направлении 2207 нм, даже когда каолинит присутствует в таком небольшом количестве, что его невозможно надежно обнаружить по поглощению на длине волны 2160 нм. В качестве примера, рисунок 13 иллюстрирует интерференцию каолинита в области поглощения 2200 нм вблизи богатой каолинитом жилы и ее зазубрин.

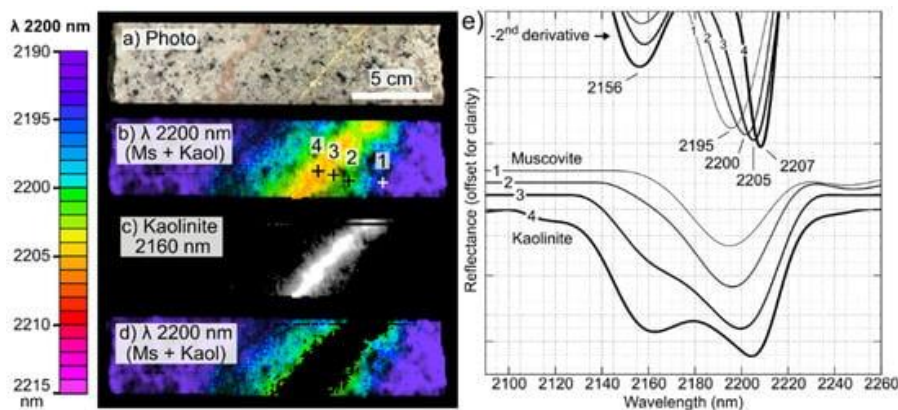


Рис. 13 Интервалы ядра (на рисунке 9):

(a) фотография ядра; (b) Гиперспектральное изображение включает помехи от каолинита; (c) каолинит с поглощением около 2160 нм; (d) изображение с маскировкой пикселей, показывающих поглощение 2160 нм; (e) удалена детализация континуума и извлечены спектры второй производной из области размера  $3 \times 3$  пикселя, указанной в (b).

Фоновая белая слюда демонстрирует поглощение около 2195 нм, в то время как чистый каолинит демонстрирует поглощение при 2207 нм. Присутствие каолинита, обнаруженное на

длине волны 2160 нм на рисунке 13с и замаскировано на рисунке 13d. Хотя значительная часть мешающего каолинита была скрыта от этого вторичного элемента, на больших расстояниях в венозном ореоле, по-видимому, следовые количества каолинита значительно влияют на положение полосы поглощения 2200 нм (на 5 нм). В подробных спектрах, показанных на рисунке 13е, небольшое отклонение происходит вблизи 2160 нм в спектре 2 (видно во второй производной) и практически не обнаруживается на отдельных пикселях изображения (представленные спектры всегда представляют собой средние значения 3×3).

Если спектральные измерения усредняются в масштабе образца (либо на основе анализа пульпы, измерений, выполненных точечными спектрометрами, либо на основе аэрофотоснимков с низким пространственным разрешением), из-за интерференции каолинита необходимо тщательно интерпретировать обычно исследуемое положение поглощения белой слюдой с длиной волны 2200 нм. Видимое положение поглощения в 2200 нм может отражать химический состав белой слюды, но при HVC в основном отражает количество мешающего каолинита, как показано на рисунке 12. Образцы из ядра отложений (в которых может присутствовать каолинит) демонстрируют поглощение около 2207 нм, в то время как удаленные образцы (без каолинита) демонстрируют среднее поглощение около 2195 нм. Как показано на предыдущих рисунках, гидротермальная белая слюда (прожилки и зазубрины жил), как ожидается, будет мусковитовой (с низким содержанием алюминия, 2195 нм) в пределах месторождения (рис. 5d), но может находиться в богатой каолинитом матрице, демонстрирующей более длительное поглощение (рис. 5b). Тем не менее, обнаруживаемое изменение видимого поглощения в 2200 нм может оказаться эффективным инструментом для определения направления минерализации в региональных поисковых кампаниях, будь то вызванное реальными изменениями в составе мусковита или вмешательством каолинита, поскольку и то, и другое может указывать на гидротермальные изменения.

## **7. Выводы.**

1. Гиперспектральная визуализация в проксимальном коротковолновом инфракрасном диапазоне является эффективным методом для характеристики сложной мелкозернистой минералогии в порфировом районе Хайленд-Вэлли. Более двенадцати минералов могут быть спектрально идентифицированы и определены количественно, а физические параметры, такие как размер зерен белой слюды, могут быть оценены спектрально.

2. На м-ниях Вэлли, Лорнекс и Хаймонт, помимо сульфидов, кварца и каолинита, наиболее заметным изменением, связанным с минерализацией, является наличие крупнозернистых (>1 мм) прожилков белой слюды, которые по составу являются мусковитовыми (2195 нм). Пренит

является наиболее удаленным спектрально обнаруживаемым измененным минералом (образующим кольцевую зону изменений на расстоянии до 8 км от м-ний), а жилы часто представляют собой вкрапления крупнозернистой фенгитовой (2215 нм) белой слюды. На Вифлеемском м-нии и в отдельных проявлениях на периферии батолита образуются турмалин и большое количество эпидота с сульфидной минерализацией. В совокупности присутствие этих семи минералов используется для определения показателя спектральных изменений, который хорошо работает во всем батолите Гишон-Крик и позволяет различать минерализованные и неминерализованные образцы.

3. Поскольку оценка изменений зависит исключительно от присутствия или отсутствия этих ключевых минералов, которые могут быть идентифицированы простыми в вычислительном отношении методами, это может послужить для улучшения методик каротажа керна, в качестве эффективного показателя геометаллургических показателей или в качестве показателя, который можно использовать для характеристики ресурсов для облегчения сортировки руды.

4. Поскольку получение гиперспектральных данных об образцах горных пород происходит быстро и практически не требует подготовки, спектроскопия SWIR imaging может служить быстрым инструментом региональных поисков. В качестве альтернативы, в районах, относительно свободных от растительного покрова, таких как север Канады, с той же целью можно использовать данные гиперспектральной съемки с БПЛА или со спутников.

## VIII. ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРО-ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРАНОВЫХ М-НИЙ (регион Циньлин, Китай) [8].

### 1. Введение.

Поиск глубоко залегающих «скрытых» м-ний с высоким содержанием металлов стал основным направлением текущих и будущих работ по прогнозированию и поискам м-ний, в т. ч. урана.

Аэрогамма-спектрометрия — это быстрый и эффективный метод непосредственного обнаружения м-ний урана и изучения ураноносных сред. Аэрогамма-спектрометрические данные в первую очередь отражают силу поверхностного радиоактивного физического поля, а также некоторую информацию о глубоко залегающей минерализации, наложенную на сложный фон. Извлечение и идентификация скрытой информации о минерализации урана стали актуальной темой в современных исследованиях. В последние годы на основе данных воздушной радиометрии для изучения скрытой информации о урановой минерализации использовались различные методы извлечения слабой информации, такие как метод приращения урана по геологическим единицам, метод нормализации по торию, метод коэффициента миграции урана, метод F-параметра и метод корреляционного анализа, которые позволили получить положительные результаты.

Район исследования расположен в южном Циньлинском металлогеническом поясе, где наблюдается интенсивная тектоническая и магматическая активность, создающая благоприятные геологические условия для урановой минерализации. Однако из-за таких факторов, как обширный лесной покров, пересечённая местность и скрытые рудные тела, поиски урановых м-ний не дали заметных результатов. В данном исследовании использовали высокоточные данные аэрогамма-спектрометрии (AGRS) с разрешением 1:50 000. При выявлении урановых аномалий AGRS были эффективно устранены различные мешающие факторы. Для создания многоэлементной комбинированной модели параметров были использованы параметры, связанные с обогащением урана, в том числе содержание палеоурана (Gu), количество активированного урана (Fu), коэффициент содержания урана (UA) и коэффициент обогащения урана (Uc).

### 2. Геологический обзор исследуемой территории.

Синим цветом на рисунке 1 обозначена исследуемая территория, расположенная в центральной части Циньлинского орогенного пояса и характеризующаяся глубокими впадинами и большими перепадами высот, с максимальным перепадом более тысячи метров.

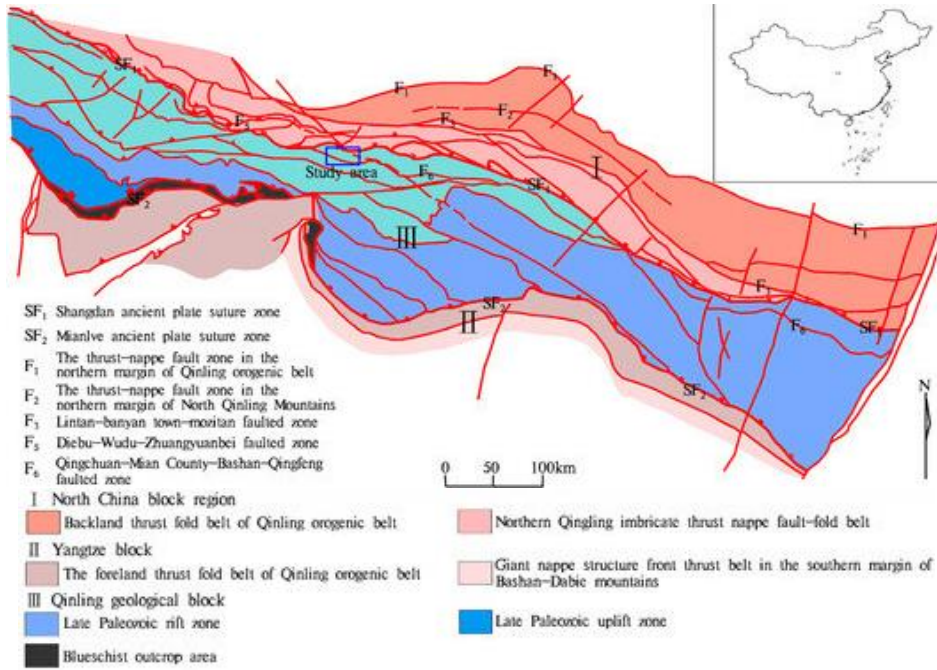


Рис. 1 Тектонические единицы Циньлинского орогенного пояса.

Рельеф понижается с северо-запада на юго-восток. С точки зрения тектонического районирования, с севера на юг выделяются три вторичные тектонические единицы: зона надвигов с толстой корой в северной части Циньлиня, зона разлома Шандан и северная зона надвигов в северной части Циньлиня (позднепалеозойская рифтовая зона в северной части Циньлиня). Более 95% территории расположено в позднепалеозойской рифтовой зоне южной части микроплиты Северный Циньлин. В исследуемом районе образовались различные типы разломов, которые либо сопровождают впадины и долины рек, либо пререзают породы, служа основными границами формаций в этом районе (рис. 2).

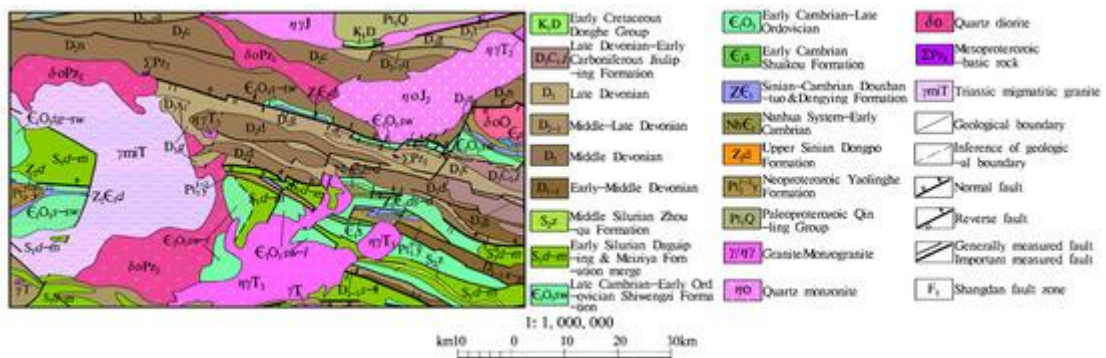


Рис. 2 Геологическая карта исследуемой территории.

Разломы в основном ориентированы с востока на запад и с северо-запада на юго-восток, а некоторые имеют направление с севера на северо-восток. Стратиграфия в северном Циньлинском орогенном поясе основным представляется обнажениями древней метаморфической группой Циньлин (P<sub>1</sub>Q), которая представляет собой набор

метаморфических пород со степенью метаморфизма, достигающей амфиболитовой фации, и состоит из терригенных обломочных и карбонатных пород.

Магматическая активность в районе чрезвычайно высока, а площадь обнажённых горных пород составляет почти половину всего региона. Ультраосновные породы ( $\Sigma Pz_2$ ) встречаются спорадически и в основном образовались в позднем палеозое. Среднеосновные магматические породы образовались в раннем палеозое, позднем палеозое и мезозое. К преобладающим магматическим породам относятся кварцевый диорит ( $\delta oO$ ,  $\delta oPz_2$ ), кварцевый монзонит ( $\eta oJ_2$ ), диорит ( $\eta \gamma J$ ,  $\eta \gamma T_3$ ), гранит ( $\gamma T$ ) и смешанный гранит ( $\gamma miT$ ).

Зона разлома Шандан в пределах исследуемой территории простирается с северо-запада на юго-восток и с северо-востока на юго-запад и расположена в северо-восточной части исследуемой территории. Она в основном состоит из комплекса кислых милонитов, гранитных милонитов и кислых вулканических пород группы Даньфэн ( $\eta \gamma J$ ), которые по своим характеристикам схожи с серпентинитами и часто встречаются в виде полос и чередующихся участков.

### 3. Измерение уровня гамма-излучения.

Основные геологические структуры в районе исследования преимущественно ориентированы с востока на запад или с северо-запада на юго-восток. Основные линии съёмки были ориентированы с севера на юг ( $0-180^\circ$ ) с интервалом между линиями 500 м. Масштаб измерений - 1:50 000 (рис. 3).

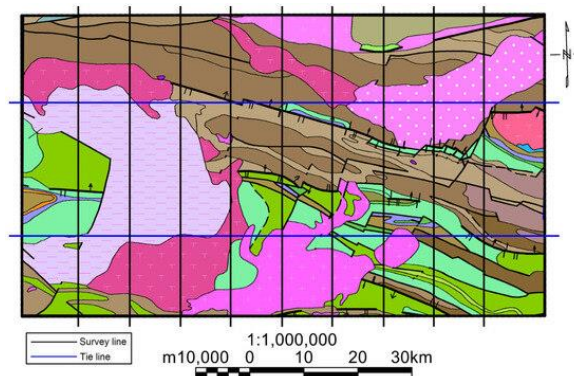


Рис. 3 Схема сети наблюдений в исследуемой области.

Для измерения аэромагнитной гамма-спектрометрии использовали высокоточный 1024-канальный бортовой гамма-спектрометр RS-500, представленный компанией Radiation Solutions Inc. (Миссиссога, Онтарио, Канада). Всего было обследовано 10,7 тыс км. Были получены радиометрические данные при средней высоте полёта 135 м и средней скорости полёта 128 км/ч. Точность GPS-позиционирования составила 1,97 м в восточном направлении, 0,96 м в северном направлении и 2,88 м по вертикали, а среднее расстояние отклонения

составило 10,96 м при плотности линий съёмки  $500 \pm 17,5$  м. Радиоактивный кристалл спектрометра продемонстрировал высокую стабильность: максимальная скорость изменения за 7 часов составила 3,5%, энергетическое разрешение — от 8,8% до 10,7%, дрейф пиков — от  $-0,95$  до  $0,3$  канала, а скорость изменения базовой линии — от  $-4,89\%$  до  $10,27\%$  между утренними и вечерними измерениями. Прибор продемонстрировал безупречную работу с нулевым временем ожидания (0 мкс) и погрешностью системы выборки 0,00%.

Собранные данные аэромагнитной гамма-спектрометрии были скорректированы с учётом фона от летательных аппаратов, космического излучения, атмосферного радона, комптоновского рассеяния (коррекция коэффициента поглощения) и ослабления на высоте. Скорректированный коэффициент счёта был использован для расчёта наземных концентраций нуклидов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , при этом концентрации урана и тория выражались как eU и eTh соответственно в ppm. Содержание калия выражалось как K в процентах. Общее количество окон было переведено в эквивалентное содержание урана, известное как единица измерения радиации (Ur).

#### **4. Метод извлечения слабой информации из данных аэрогамма-спектрометрии.**

Изотопы урана, калия и тория проявляют различную активность в разных геохимических средах. Калий очень активен как в окислительной, так и в восстановительной среде. Уран обладает высокой миграционной способностью в окисленном состоянии, он может растворяться или адсорбироваться и мигрировать. Однако в восстановительных условиях его активность не так высока, что делает его менее склонным к растворению и миграции. Торий, обладая стабильными химическими свойствами, в большинстве случаев менее растворим. При выщелачивании и миграции урана торий обычно задерживается и часто мигрирует в форме механического переноса.

В процессе минерализации урана изменения давления, температуры, pH и Eh приводят к перераспределению калия, урана и тория, в результате чего образуются диффузные ореолы с равномерным распределением. Параметры соотношения отдельных элементов могут отражать различия в распределении различных радиоактивных элементов в одной и той же части исследуемой области, однако их эффективность относительно ограничена и часто неоднозначна. Поэтому при обработке данных аэрогамма-спектрометрии эти параметры часто вводятся в качестве промежуточных переменных в расчёт характеристических параметров. Параметры многоэлементных комбинаций объединяют различную информацию, основанную на параметрах соотношения отдельных элементов, подавляя помехи, улучшая соотношение сигнал/шум и позволяя проводить дальнейший анализ миграционных характеристик

радиоактивных элементов, тем самым лучше изучая информацию о радиоактивных аномалиях, связанных с урановой минерализацией и рудообразующей средой, в данных аэрогамма-спектрометрии. Параметры многоэлементных комбинаций, полученные с помощью аэрогамма-спектрометрии, и их геологическое значение приведены в таблице 1.

Табл. 1.

Модель многоэлементной комбинированной параметрической спектрометрии.

| Method Type                          | Parameters  | Mathematical Model                   | Geological Significance  |
|--------------------------------------|---|--------------------------------------|--|
| Single-element                       | Uranium content<br>Potassium content<br>Thorium content                     | $eUKeTh$                             | Studying the regional distribution patterns and trends of various elements and comparing differences in elemental contents to obtain valuable geological prospecting information.  |
| Single-element ratios                | Uranium–thorium ratio<br>Uranium–potassium ratio<br>Thorium–potassium ratio | $eTh/eUeU/KeTh/K$                    | In special circumstances, elements may be relatively enriched or depleted, with U separating from Th and K through precipitation. Therefore, changes in ratios can indicate processes such as weathering, depositional environments, mineralization, and other specific geological actions.  |
| Multi-element combination parameters | Paleo-uranium content (Gu)  | $eTh/(\overline{eTh}/\overline{eU})$ | Using the relative stability of thorium elements, high-value zones indicate the uranium source layer (body) under the element's state.   |
|                                      | Activated uranium migration amount (Fu)                                     | $eU - Gu$                            | Utilizing the difference between measured uranium and "paleo-uranium" to quantify the activation migration of uranium elements in the later stages of diagenesis. Evaluating the leaching or superimposed enrichment of uranium elements in the study area based on the average value or trend of Fu within the region to understand the differences and numerical changes between paleo-uranium and present-day measured uranium. Assessing the activation migration amount of uranium in the region. |
|                                      | Uranium abundance index (UA)  | $eU-K/eTh$                           | Also known as the F-parameter, the alteration degree of rocks in hydrothermal uranium exploration plays a significant indicative role. By normalizing uranium and thorium to potassium elements, it can highlight the low-to-medium temperature potassic alteration zones. A higher value indicates a stronger degree of rock alteration. Additionally, it is important to understand the original abundance level and superimposed enrichment status of uranium.                                      |
|                                      | Uranium migration enrichment factor (Uc)                                    | $eU^3/eTh-K$                         | The migration and enrichment of uranium under geochemical processes in the search for prospective areas.   |

Note:  $\overline{eTh}$  and  $\overline{eU}$  represent the average thorium content and average uranium content in the study area.

Такие параметры, как содержание древнего урана (Gu), количество активированного урана (Fu), индекс содержания урана (UA) и коэффициент обогащения урана (Uc), оказывают более значительное влияние на усиление и извлечение слабой информации при измерениях с помощью аэрогамма-спектрометрии.

## 5. Анализ данных аэрогамма-спектрометрии в районе исследования.

### 5.1. Общие характеристики аэрогамма-спектрометрии.

Был проведён статистический анализ содержания радиоактивных элементов в различных пластах и магматических породах в исследуемой области. Среднее общее количество радиоактивных элементов составило 11,97 Бк, среднее содержание калия — 1,34% (Кларк - 2,04%), среднее содержание урана — 3,87 ppm (Кларк - 1,70 ppm), а среднее содержание тория — 7,43 ppm (Кларк - 5,80 ppm). Результаты измерений по всей территории показывают, что

содержание урана и тория значительно выше, чем Кларк, что указывает на общую тенденцию к обогащению ураном и торием в исследуемой области (рис. 4).

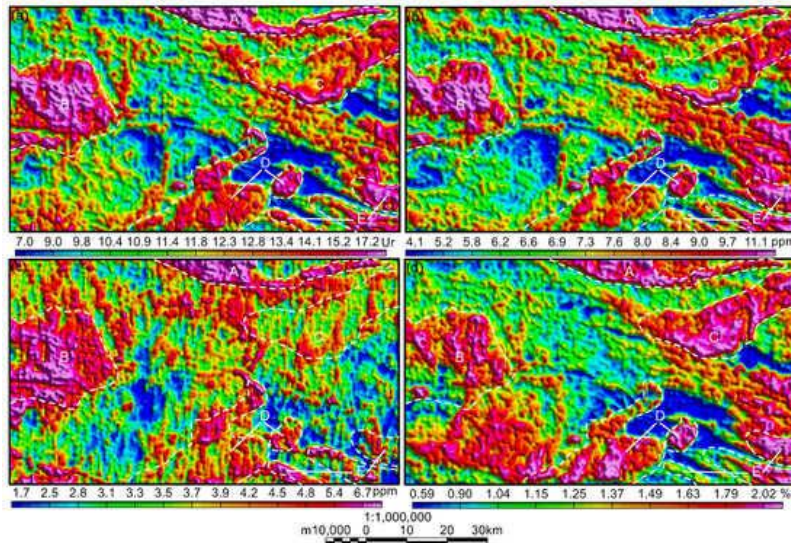


Рис. 4 Аэрогамма-съемка в исследуемой области: (а) ТС; (б) eTh; (с) eU; (д) К.

В исследуемой области в целом наблюдается высокий уровень радиоактивного фона с неравномерным распределением. Зоны с высокой аномальной активностью расположены в пределах Шанданской зоны разломов (А), в районе обнажения триасовых гранитов ( $\gamma\text{mT}$ ) (В), на южной окраине среднеюрских кварцевых диоритов ( $\eta\text{J}_2$ ) (С), в районе обнажения поздне триасовых диоритовых гранитов ( $\eta\text{T}_3$ ) (D) и в районе обнажения силурийских пластов на юго-восточной окраине исследуемой территории (Е). Слабые аномалии в основном расположены в межпластовых зонах раннепалеозойской кембрийско-ордовикской формации Шуйгоуку, формации Шивэньцзы, формации Байлундун и формации Лянчаоку ( $\text{Є}_3\text{O}_3\text{s-w-I}$ ,  $\text{Є}_3\text{O}_1\text{s-sw}$ ). Характеристики распределения этих радиоактивных аномалий отражают тот факт, что в районах с интенсивной магматической активностью в областях, где обнажаются среднекислые вулканические породы, наблюдается более высокий уровень радиоактивности, формирующий очаговые зоны с высокой радиоактивностью. Высокое содержание радиоактивных веществ в силурийских пластах на юго-востоке исследуемой территории в основном обусловлено наличием углеродистых чёрных сланцев с более высокой степенью метаморфизма. Фоновое поле в пределах территории в основном соответствует обнажениям позднепалеозойских девонских пластов.

Содержание тория в пределах исследуемой территории в целом соответствует общему уровню радиоактивности. Однако градиент границы с высоким или повышенным содержанием тория более крутой, чем градиент общего уровня радиоактивности, а аномалии с высоким или повышенным содержанием тория в отдельных участках более выражены. Характеристики

распределения калия в регионе существенно отличаются от общего профиля, особенно в районах обнажения кварцевых диоритов средней юры ( $\eta J_2$ ) (С) и кварцевых диоритов позднего палеозоя ( $\delta Pz_2$ ) (F), где содержание калия заметно повышено. Общее содержание урана хорошо согласуется с высоким содержанием урана в зонах разлома Шандан (А), в обнажениях триасовых смешанных гранитов ( $\gamma mT$ ) (В) и в обнажениях силурийских пластов (Е); однако следует отметить, что их общая форма существенно различается. Также в различных геохимических средах уровни активности урана, калия и тория различаются.

Характеристики распределения радиоактивных веществ на территории строго контролируются региональной тектоникой: в северной части на распределение влияет зона разлома Шандан и обнажающиеся магматические породы, простирающиеся с северо-запада на северо-восток; в западной и южной частях распределение образует блочные структуры под влиянием обнажающихся магматических пород; в юго-восточной части распределение простирается на северо-запад под контролем силурийских пластов.

### **5.2. Параметры соотношения радиоактивных элементов.**

Изменение параметров гамма-спектрометрии иногда более чувствительно, чем абсолютные значения, для определения степени изменения горных пород, разграничения зон изменения, выявления минерализации и других специфических геологических процессов. Это имеет большое значение для прогнозирования перспективных участков.

#### Соотношение тория и калия.

Исследования показали, что снижение отношения  $eTh/K$  до минимального значения менее 2 указывает на геохимическую однородность в регионе и предполагает наличие изменённых пород в местах калийных аномалий. Как показано на рисунке 5, процессы изменений в исследуемой области в основном сосредоточены на обнажённых участках докембрийской группы Циньлин к северу от зоны разлома Шандан, в западной части среднеюрского кварцевого диорита ( $\eta J_2$ ) и в обнажённых участках позднепалеозойского кварцевого сиенита ( $\delta Pz_2$ ).

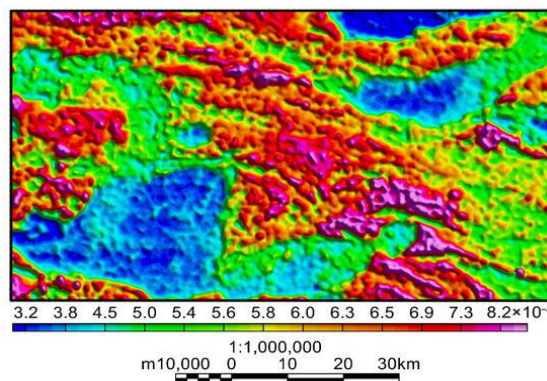


Рис. 5 Карта соотношения  $eTh/K$  в исследуемой области.

### Соотношение тория и урана

Соотношение  $eTh/eU$  составляет от 2,0 до 0,7 (часто 0,7), обычно связано с образованием м-ний урана (когда соотношение составляет от 2,5 до 4,0, образуется м-ние смешанной уран–ториевой руды; а когда соотношение превышает 5,0–8,0, – ториевой руды. Соотношение тория и урана в обнажённых участках триасовых смешанных гранитов ( $\gamma mT$ ) и силурийских пластов в исследуемой области варьируется от 0,3 до 3,7, что указывает на потенциальное образование урановых руд. Среднее соотношение тория и урана по всей области составляет 3,15, что позволяет предположить, что урановая минерализация в исследуемой области в основном связана с совместным присутствием урана и тория (рис. 6).

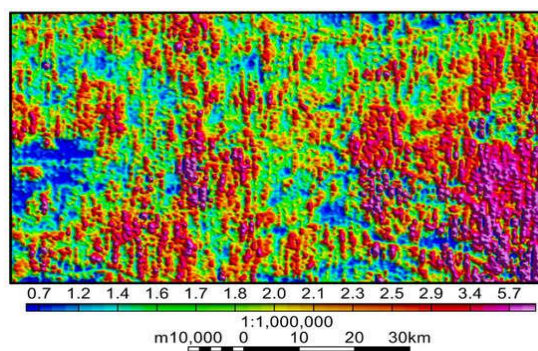


Рис. 6 Карта соотношения  $eTh/eU$  в исследуемой области.

Соотношение торий–уран также обычно используется для анализа общих закономерностей осадочных сред и фаций: когда  $eTh/eU$  меньше 2, это обычно указывает на глубоководную осадочную среду в условиях сильного восстановления, часто приводящих к образованию серых или зеленых сланцев; когда  $2 < eTh/eU < 7$ , это относится к среде, переходной от восстановительной к окислительной, такой как прибрежные или литоральные осадочные среды; когда  $eTh/eU$  больше 7, это указывает на окисляющую среду, обычно связанную с континентальным осадконакоплением. В исследуемом районе представлены различные осадочные породы.

### Соотношение урана и калия

В исследуемом районе зоны с высоким соотношением  $eU/K$  в основном расположены в зоне разлома Шандан, на обнажённых участках триасового смешанного гранита ( $\gamma mT$ ) и в силурийских пластах (рис. 7). При будущих исследованиях в области разведки полезных ископаемых следует обратить внимание на эти районы с высоким соотношением  $eU/K$ .

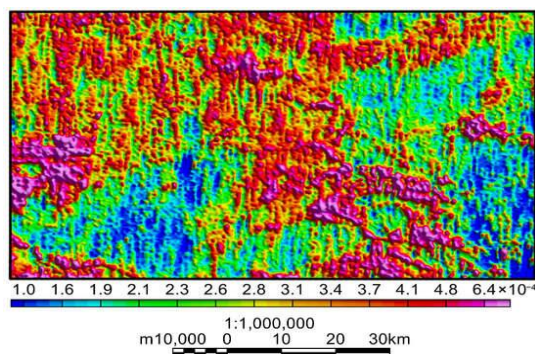


Рис. 7 Карта соотношения eU/K в исследуемой области.

### 5.3. Характеристики многоэлементных комбинаций в ключевых областях.

Параметры многоэлементных комбинаций объединяют различную информацию, основанную на параметрах соотношения отдельных элементов, что позволяет проводить дальнейший анализ характеристик активации и миграции радиоактивных элементов. Такой целенаправленный анализ помогает оценить перспективные ураноносные районы. Изображение рассчитанных параметров многоэлементных комбинаций в исследуемом районе показано на рисунке 8.

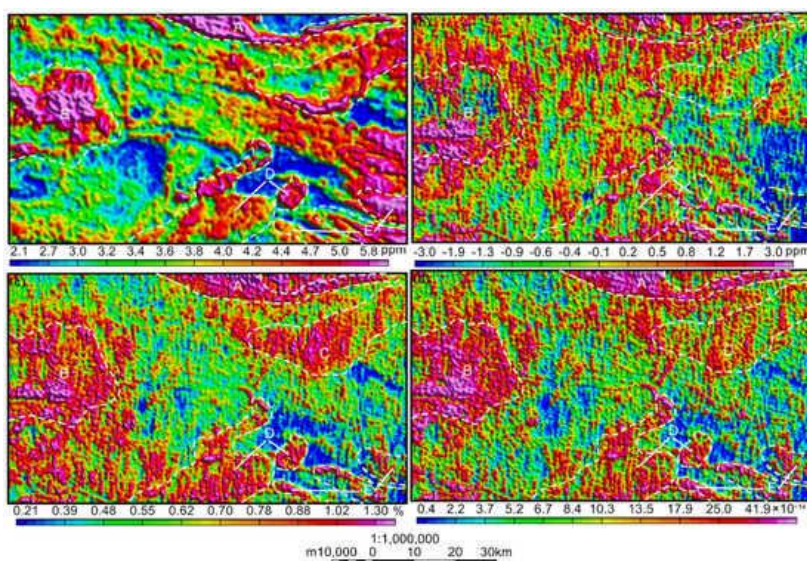


Рис. 8 Карты усиленных параметров многоэлементных комбинаций исследуемой области:  
(a) Gu; (b) Fu; (c) UA; (d) Uс. Белая пунктирная линия - диапазон аномальных областей, а буквы А-Е - пять аномальных областей.

На основе данных воздушной гамма-спектрометрии было установлено, что среднее содержание урана в исследуемой области составляет 3,87 ppm, что значительно выше, чем значение Кларк, составляющее 1,7 ppm, что указывает на то, что это регион с высоким содержанием урана. Однако существуют значительные различия в содержании урана между различными геологическими формациями и типами пород (рис. 4с). В целом, в районах залегания урановых руд (палеозойские пласты, магматические породы) содержание урана в древних породах (Gu) выше, а количество активированного урана (Fu), мигрировавшего в

новые породы, отрицательно или значительно ниже, что указывает на активацию и миграцию урана в исследуемом районе.

В районе Циньлин ураново-полиметаллические рудоносные слои в основном представлены урановыми минералами в гранитах, преобладающих в зоне разлома Шаньдан. Силурийская формация Дизбу, формация Чжоуцю и формация Байлунцзян в совокупности образуют морскую углеродистую кремнистую толщу сланцы. Проявления урана (точки) в исследуемом районе в основном представлены контролируемыми слоями гидротермально изменённых углеродистых кремнисто-глинистых сланцев.

#### Характеристики радиоактивных параметров в зоне А

Тенденция распределения содержания урана (рис. 4с) в зоне А, которая в основном относится к расположению зоны разлома Шангдань и кислых вулканических пород группы Даньфэн, показывает зону с высоким содержанием  $eU > 3,9$  ppm, что указывает на зону источника с магматическими породами в качестве источника эрозии, демонстрирующими полосчатое распределение. Благодаря тщательному анализу информации можно четко увидеть (рис. 8), что содержание палеоурана (Gu) в целом соответствует распределению содержания урана, что также является показателем высокой ценности. Общая миграция активированного урана (Fu) преимущественно положительная, со средним показателем миграции 1,49 ppm, что указывает на постметаморфическую миграцию урановых элементов в этом районе. Индекс содержания урана (UA) демонстрирует высокую концентрацию по всей исследуемой территории, что указывает на значительные гидротермальные изменения и служит важным индикатором урановой минерализации. Аналогичным образом, коэффициент обогащения урана (Uc) также показывает зону с высоким значением аномалии, что указывает на то, что в дополнение к исходному высокому содержанию урана в урановом рудном слое (теле) элементы урана мигрировали и образовали наложенное пост-обогащение в результате геохимических процессов, что является важным показателем для определения перспективных участков.

В то же время он имеет геологические сходства с урановыми рудоносными породами всего региона Циньлин. Геологическая карта в масштабе 1:1 000 000 указывает на то, что литология представляет собой биотитовый гранит юрского периода ( $\eta J$ ). Однако полевые исследования показали, что в восточной узкой зоне разлома Шандан преобладают биотитовые гнейсы и гранитные гнейсы; в то же время в более широкой западной зоне преобладает биотитовый гранит группы Даньфэн ( $\eta J$ ) с несколькими обнажёнными пегматитовыми жилами.

#### Характеристики радиоактивных параметров в зоне В

Зона В расположена на западной окраине исследуемой территории, в основном обнажая смешанный гранит триасового периода ( $umIT$ ), с незначительными обнажениями кембрийско–

ордовикской формации Доушантуо ( $Z_2\epsilon_{1d}$ ), формации Донгпо ( $Z_2d$ ), раннепалеозойской кембрийско–ордовикской формации Шуйгоуко, формации Юэцзяпин и формации Шивенгзи с прослоями ( $\epsilon_1 O_{1sw-sw}$ ), в дополнение к силурийской формации Дагипин и Формация Мейзия с прослоями ( $S_{1d-m}$ ).

Тенденция распределения урана в исследуемом районе показывает область с высокой ценностью (рис. 4с), где среднее содержание  $eC$  достигает 6,29 ppm, что почти в четыре раза превышает значение содержания в земной коре в 1,70 ppm при максимальном значении 34,55 ppm. Эта область считается зоной очага эрозии с метаморфическими горными породами в качестве источника, распределенными блочно. Благодаря слабому извлечению информации можно чётко увидеть (рис. 8), что высокоценная область с высоким содержанием урана ( $Gu$ ) примерно в два раза меньше высокоценной области с высоким содержанием урана. Зона с высоким содержанием урана в основном сосредоточена в северной части зоны В, что аналогично распределению тория в этой зоне, но с более чёткими границами. Среднее содержание урана в древних породах составляет 4,88 промилле, а максимальное значение — 9,05 промилле, что указывает на значительное обогащение ураном этой зоны на более поздних этапах. Общая картина миграции активированного урана ( $Fu$ ) показывает, что в северной части области преобладают отрицательные значения, указывающие на миграцию урана из этой области, в то время как в южной части преобладают положительные значения, указывающие на миграцию урана в эту область. Средний отток активированного урана в области составляет примерно 1,3 промилле, а средний приток — примерно 2,7 промилле, что указывает на миграцию урана в область после формирования горных пород. Индекс содержания урана ( $UA$ ) смещён в сторону более богатых районов, особенно в силурийской зоне обнажения к северу от кембрийских пластов, что указывает на возможное вторжение магматических пород и значительные гидротермальные изменения. Коэффициент обогащения урана ( $Uc$ ) также демонстрирует аномальные области с высоким содержанием урана, что указывает на дальнейшую миграцию и обогащение урана на основе исходного слоя (слоёв) с высоким содержанием урана, что является важным доказательством для определения перспективных поисковых участков.

#### Характеристики радиоактивных параметров в зоне С

Зона С в основном расположена в районе обнажения кварцевых диоритов средней юры ( $\eta O_2$ ) с развитыми разломами на южной границе, которые переходят с северо-запада на юго-восток, а затем на северо-восток и юго-запад. Изображение содержания урана (рис. 4с) показывает низкое фоновое поле со средним значением 3,85 ppm, что немного ниже общего среднего значения 3,87 ppm в исследуемой зоне. С помощью метода слабой экстракции

информации (рис. 8) обнаружили, что содержание урана в древних породах (Gu) немного отличается от содержания урана в современных породах. В древних породах содержание урана ниже, в то время как на южных и восточных границах оно умеренно высокое или высокое, в среднем 4.33 промилле, что выше, чем нынешнее содержание урана. Активированное количество миграции урана (Fu) показывает область в центре с более низким содержанием древнего урана, что указывает на миграцию урановых элементов в эту область, в то время как области с более высоким или высоким содержанием древнего урана демонстрируют значительные отрицательные значения, что говорит о явном явлении миграции урановых элементов из этих областей. Индекс содержания урана (UA) показывает более высокое содержание на юго-западе, где магматическая активность более интенсивна, что указывает на возможные гидротермальные изменения. Коэффициент обогащения урана (Uc) в основном характеризуется умеренным фоновым полем, без явных признаков значительного дополнительного обогащения урановыми элементами после формирования породы.

#### Характеристики радиоактивных параметров в зоне D

Область D относится к средне-триасовому району обнажения монцогранитов в южной части исследуемой территории (ηγТЗ). Содержание урана (рис. 4с) преимущественно соответствует фоновому уровню, при этом в некоторых локальных участках наблюдается несколько более высокая концентрация, в среднем 4,47 ppm, что немного выше среднего регионального уровня 3,87 ppm. Благодаря извлечению слабого сигнала (рис. 8) содержание древнего урана (Gu) в этой области в целом соответствует зоне с высоким содержанием урана, со средним содержанием примерно 4.29 ppm, что немного ниже текущего среднего содержания урана. Количество активированного урана, мигрировавшего в эту область (Fu), варьируется от -5,02 до 10,07 частей на миллион, при этом среднее количество мигрировавшего урана составляет около 0,18 ppm, что указывает на миграцию урана в эту область после формирования горных пород, хотя это количество относительно невелико. Коэффициент обогащения урана, мигрировавшего в эту область (Uc), аналогичен текущему профилю содержания урана и в основном показывает фоновые уровни с некоторыми локальными участками более высокой концентрации. Приведённые результаты показывают, что, исходя из исходного источника урана, миграция и обогащение урана в результате геохимических процессов происходят в основном внутри массива горных пород, при этом заметное обогащение происходит лишь в незначительной степени.

#### Характеристики радиоактивных параметров в зоне E

Участок E расположен в юго-восточной части исследуемой территории, где чередуются слои силурийской формации Дагуипинг и формации Мейзия (S<sub>1d-m</sub>), состоящие в основном из

темно-серых и черных метаморфических пород. Содержание урана, как показано на изображении (рис. 4с), характеризуется преимущественно высокими и очень высокими значениями, при этом области с высоким содержанием урана расположены вдоль геологической линии, ориентированной на северо-запад, и имеют среднее содержание около 3,84 ppm. Максимальное значение может достигать 13,38 ppm, что немного ниже среднего значения для всей исследуемой области, но более чем в два раза превышает содержание урана в земной коре. После выделения слабого сигнала (рис. 8) содержание урана (Gu) в этой области в древности несколько отличалось от современного содержания урана. Высокоценные участки с высоким содержанием урана в основном сосредоточены в центральной и северной частях зоны Е и хорошо согласуются с геологическим направлением, в то время как южная граница представляет собой фоновое поле. Среднее содержание урана в древних месторождениях составляет примерно 4,70 промилле, что выше, чем в современных проявлениях. Характер распределения активированной миграции урана (Fu) аналогичен текущему содержанию урана, за исключением того, что в силурийских пластах в южной зоне воздействия наблюдается отрицательная активированная миграция урана в диапазоне от -6,98 до 9,27 ppm, в среднем около -0,86 ppm, что указывает на истощение запасов урана и его миграцию в пределах территории. Изображение индекса содержания урана (UA) в целом имеет ту же структуру, что и изображение количества активированного урана (Fu), с характерными полосами в центральной и южной частях, которые, возможно, связаны с контактами между пластами, подвергшимися гидротермальным изменениям, способствующим образованию урановых месторождений. Коэффициент обогащения урана (Uc) в целом имеет ту же структуру, что и текущее содержание урана, и преимущественно демонстрирует высокие и очень высокие значения в северо-западном направлении вдоль геологического разлома. Приведённые результаты указывают на то, что, исходя из исходного слоя-источника урана, элементы урана мигрировали и образовали наложенное друг на друга пост-обогащение в результате различных геохимических процессов, что является важным доказательством для определения перспективных участков для поисков.

#### ***5.4. Прогноз перспективных участков урановой минерализации.***

На основе приведенного выше анализа условий рудообразования были выделены значимые аномалии содержания урана ( $>9,77$  ppm), тория ( $>13,56$  ppm), калия ( $>2,57\%$ ) и соотношения уран-калий ( $>7,41 \times 10^{-4}$ ), а также значимые аномалии коэффициента содержания урана ( $>1,88$  ppm) и коэффициента миграционного обогащения урана ( $>114,94$  ppm), выявленные путем извлечения слабой информации, расположенные в зонах положительной миграции урана (т.е. зонах поздней миграции урана). Критерии исключения включали в себя

водоёмы, четвертичные зоны и высоты, превышающие 180 м. Аномалии с высоким значением были выбраны на основе трёхкратного превышения стандартного отклонения от среднего значения по региону. На основе выбранных аномалий, полученных с помощью параметров аэрогамма-спектрометрии, были выделены перспективные участки минерализации. Всего в пределах исследуемой территории было выявлено три перспективных участка (I–III), как показано на рисунке 9.

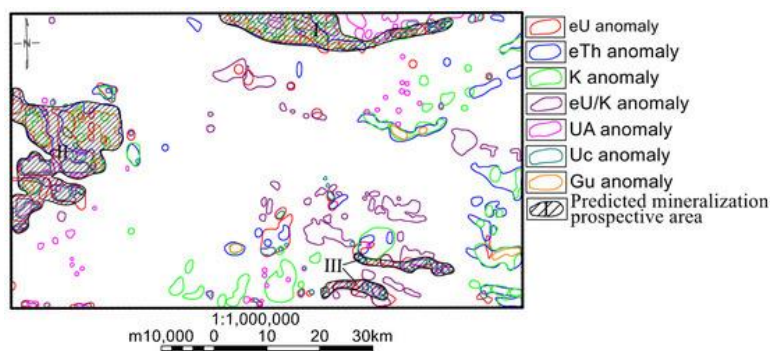


Рис. 9 Схема многопараметрических аномалий и перспективные ураноносные участки.

## 6. Выводы.

1. Используя характеристики геохимической активности радиоактивных элементов урана, тория и калия, в дополнение к традиционному анализу содержания, общего количества и основных параметров соотношения была разработана математическая модель, основанная на параметрах комбинации нескольких элементов. Эта модель помогает понять геологическое значение этих параметров и позволяет извлекать из данных дополнительную информацию. Это позволяет оценить условия формирования урановой минерализации, спрогнозировать перспективные участки и проанализировать содержание урана, урановые рудные слои (тела), характер активации и миграции урана, а также уровни обогащения урана в пределах исследуемой территории. Этот подход демонстрирует практическую ценность при оценке условий урановой минерализации и прогнозировании перспективных участков.

2. Перспективные урановые проявления характеризуются повышенным содержанием урана, калия и тория, а также высоким соотношением урана и калия. После обработки и извлечения дополнительной информации эти проявления или их окрестности демонстрируют высокие значения палеоурана (Gu), указывающие на наличие урановых рудоносных слоёв (тел). Общее количество активированного урана (Fu) преимущественно положительное, что свидетельствует о притоке урана после формирования породы. Увеличение содержания калия и урана значительно превышает увеличение содержания тория, что приводит к заметному росту индекса содержания урана (UA), указывающего на возможные гидротермальные изменения в этом районе. Коэффициент обогащения урана (Uc) также имеет высокие значения, что

позволяет предположить, что урановые элементы мигрировали и накапливались поверх существующих урановых рудоносных слоёв в результате геохимических процессов. Эти высокочисленные аномалии элементов служат важнейшими индикаторами для прогнозирования урановой минерализации, при этом более богатая индикаторная информация указывает на более благоприятные условия формирования.

3. На основе геологических данных исследуемой территории, а также общих характеристик аэрогамма-спектрометрии содержания урана, калия и тория, в дополнение к характеристикам параметров соотношения между элементами, был проведён подробный анализ. После всестороннего объяснения параметров многоэлементных комбинаций в ключевых областях были выявлены благоприятные аномалии урановой минерализации по данным аэрогамма-спектрометрии. Были выявлены три перспективные зоны урановой минерализации, характеризующиеся благоприятными геологическими условиями, богатой информацией об аномалиях, полученной с помощью аэрогамма-спектрометрии, и многообещающим потенциалом для поисков в этом районе

## ИСТОЧНИКИ:

1. Julian M. Ortiz, Sebastián Avalos, Paula Larrondo, Ximena Prieto, Nicolás Avalos, Bernabé Lopez, Javier Santibañez, Mónica Vukasovic, Nelson Cortés and Jaime Díaz. «ADVANCED RESOURCE MODELLING AND AGILE SCENARIO GENERATION FOR MINERAL EXPLORATION AT THE Cu-Au (Mo-Ag) SAN ANTONIO–POTRERILLOS DISTRICT, CHILE». *Minerals* 2026, 16.
2. Le Ouyang, Kaixuan Tan, Yongmei Li, Zhenzhong Liu, Hao Zhou, Chunguang Li, Yanshi Xie and Shili Han «TRACE ELEMENT GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF PLANTS AND THEIR ROLE IN INDICATING CONCEALED ORE BODIES OUTSIDE THE SHIZHUYUAN W–Sn POLYMETALLIC DEPOSIT, SOUTHERN HUNAN PROVINCE, CHINA». *Minerals* 2024, 14.
3. Mobin Saremi, Milad Bagheri, Seyyed Ataollah Agha Seyyed Mirzabozorg, Najmaldin Ezaldin Hassan, Zohre Hoseinzade, Abbas Maghsoudi, Shahabaldin Rezania, Hojjatollah Ranjbar, Basem Zoheir and Amin Beiranvand Pour. «EVALUATION OF DEEP ISOLATION FOREST (DIF) ALGORITHM FOR MINERAL PROSPECTIVITY MAPPING OF POLYMETALLIC DEPOSITS». *Minerals* 2024, 14.
4. Pablo Núñez, Tony Watts, Agustín Martin-Izard, Daniel Arias, Álvaro Rubio, Fernando Cortés and Fernando Díaz-Riopa. «AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SURVEY OVER THE TOURO COPPER VMS WORLD CLASS DEPOSIT (NW SPAIN): GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL CORRELATION». *Minerals* 2023, 13, 17.
5. Philip Lypaczewski, Benoit Rivard, Guillaume Lesage, Kevin Byrne, Michael D'Angelo and Robert G. Lee. «CHARACTERIZATION OF MINERALOGY IN THE HIGHLAND VALLEY PORPHYRY CU DISTRICT USING HYPERSPECTRAL IMAGING, AND POTENTIAL APPLICATIONS». *Minerals* 2020, 10.
6. Sankaran Rajendran, Salah al-Khirbash, Bernhard Pracejus, Sobhi Nasir, Amani Humaid Al-Abri, Timothy M. Kusky, Abduwasit Ghulam. «ASTER DETECTION OF CHROMITE BEARING MINERALIZED ZONES IN SEMAIL OPHIOLITE MASSIFS OF THE NORTHERN OMAN MOUNTAINS: EXPLORATION STRATEGY». *Ore Geol. Rev.* 2011.
7. Yao Pei, Yuanfang Wang, Xiaolong Li, Tie Gao, Shengfa Wang and Xiaoshan Zhou. «GEOLOGY-TOPOGRAPHY CONSTRAINED SUPER-RESOLUTION OF GEOCHEMICAL MAPS VIA ENHANCED U-NET». *Minerals* 2025, 15.
8. Yongzai Xi, Junjie Liu, Shan Wu, Ning Lu, Guixiang Liao, Yongbo Li, Fei Li and Niannian Qu. «THE APPLICATION OF AIRBORNE GAMMA-RAY SPECTROMETRIC MULTI-ELEMENT COMPOSITE PARAMETERS IN THE PREDICTION OF URANIUM PROSPECTING AREAS IN QINLING REGION, CHINA». *Minerals* 2025, 15.