



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

ИНФОРМАЦИОННО- АНАЛИТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ:

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

**СЕРИЯ:
ПОИСКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Москва 2025 г.

Обзор 3-5

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПОИСКОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

РЕДАКТОР-СОСТАВИТЕЛЬ:
В.В. Коротков

СОДЕРЖАНИЕ:

	Стр.
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ	
МЕТОДЫ АНАЛИЗА В ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ЦЕЛЯХ	6
I. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В ПРОГНОЗНЫХ ЦЕЛЯХ (<i>пояс Торуд-Шахширин, Иран</i>).....	7
1. Введение.....	7
2. Исследуемая территория и используемый набор данных.....	7
3. Методология.....	9
3.1. Метод случайного леса.....	10
3.2. Кривые успешности.....	11
4. Результаты и обсуждение.....	11
4.1. Предварительная обработка выбранных элементов.....	11
4.2. Извлечение эффективных одноэлементных геохимических следов....	13
4.3. Картографирование локальных геохимических аномалий.....	13
4.4. Определение структурных контролирующих факторов.....	14
4.5. Модель случайного леса.....	16
4.6. Оценка модели перспективности.....	18
4.7. Определение поисковых площадей методом t-Student.....	18
5. Выводы.....	19
II. ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ В ПОИСКОВЫХ ЦЕЛЯХ (<i>медно-порфировый район Дубаошань, Китай</i>).....	20
1. Введение.....	20
2. Геология района.....	21
3. Используемые методы и полученные результаты.....	22
3.1. Сбор и обработка данных.....	22
3.2. Многомерный компонентный анализ.....	25
3.3. Анализ фрактальной модели спектральной области.....	28
4. Выводы.....	31
III. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА	
МИНЕРАЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА (<i>район Да Хинган, Китай</i>).....	32
1. Введение.....	32
2. Материалы, обработка и методы анализа.....	33
2.1. Выделение слабых геохимических аномалий.....	34
2.2. Прогнозирование минеральных ресурсов.....	35
3. Результаты.....	37
3.1. Определение металлогенической прогнозной зоны.....	39

3.2. Результаты прогнозирования минеральных ресурсов.....	40
4. Выводы.....	41
IV. ВЫЯВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ (<i>регион Мила, Тибет</i>).....	43
1. Введение.....	43
2. Методология.....	44
2.1. Алгоритм прямой выборки (DS).....	44
2.2. Анализ локальных особенностей (LSA).....	46
2.3. Объединение вероятностей аномалий на основе анализа неопределенности.....	47
3. Территория исследования и геохимические данные.....	48
4. Результаты.....	49
4.1. Моделирование алгоритма прямого отбора проб меди.....	49
4.2. LSA на основе стохастического моделирования.....	51
4.3. Оценка неопределенности геохимической аномалии.....	53
5. Выводы.....	54
ИСТОЧНИКИ:.....	55
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ СКРЫТЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	56
I. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКИХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ (<i>Китай</i>).....	58
1. Введение.....	58
2. Исходные данные и методы.....	59
3. Результаты.....	61
3.1 Тонкие геохимические аномалии оловянного оруденения.....	61
3.2 Отрицательные геохимические аномалии железорудных объектов.....	62
4. Обсуждение.....	65
4.1 Тонкие геохимические аномалии.....	65
4.2 Отрицательные геохимические аномалии.....	66
II. МЕТОДЫ СИНГУЛЯРНОСТИ И ЗОНАЛЬНОСТИ ПРИ ПОИСКАХ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ.....	68
1. Введение.....	68
2. Геологическая обстановка.....	69
3. Метод сингулярности и анализ данных.....	69
4. Результаты сингулярности и вертикальной зональности.....	70
5. Выводы.....	72
III. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИЧНЫХ ОРЕОЛОВ И ИХ ПОИСКОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ (<i>Си-Мо м-ние Кулонг, Тибет</i>).....	73
1. Введение.....	73
2. Геология и минералогия месторождения.....	73
3. Материалы, методы обработки и анализа данных.....	74
4. Обсуждение.....	77
4.1. Характеристики первичного ореола.....	77

4.2. Геохимические параметры первичного ореола.....	81
4.3. Модель параметров денудации рудного тела.....	84
4.4. Идеальная наложенная модель первичного ореола.....	86
5. Выводы.....	87
IV. НОВЫЙ АЛГОРИТМ АНИЗОТРОПНОЙ СИНГУЛЯРНОСТИ ПРИ ПОИСКАХ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ (<i>район Дуолонг, Тибет</i>).....	89
1. Введение.....	89
2. Территория исследования и наборы данных.....	89
3. Методы.....	91
3.1. Фрактальные/мультифрактальные модели.....	91
3.2. Анализ локальных сингулярностей.....	94
3.3. Алгоритм анизотропной сингулярности.....	95
4. Тематическое исследование в рудном районе Дуолонг.....	96
4.1. Геохимическое распределение рудных элементов.....	96
4.2. Мультифрактальный анализ.....	97
4.3. Анизотропная сингулярность.....	98
4.4. Результаты и обсуждение.....	101
5. Выводы.....	102
V. ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЧВЫ ПРИ ПОИСКАХ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ (<i>Северный Китай</i>).....	104
1. Введение.....	104
2. Материалы и методы.....	104
2.1. Геологические условия.....	104
2.2. Отбор проб и анализ.....	105
3. Результаты.....	107
3.1. Исследования м-ния Хуаньюшань.....	107
3.2. Исследования м-ния Чжунсуйцзихуа.....	109
3.3. Исследования м-ния Цюцзя.....	111
4. Обсуждение.....	112
5. Выводы.....	116
VI. ОСНОВЫ ФИТОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ (<i>Африканский медно-кобальтовый пояс</i>).....	118
1. Введение.....	118
2. Пространственные тенденции геологического и геохимического воздействия на характеристики и распространение видов растений.....	119
2.1. Геологические условия ЦАМП.....	119
2.2. Фитогеографическая характеристика ЦАМП.....	120
2.3. Минерализация и геохимия микроэлементов.....	121
2.4. Геохимический контроль поведения металлов в системах наземных растений.....	122
2.5. Геохимия растительности в качестве среды для пробоотбора.....	125
3. Методы оценки использования растений для выявления месторождений..	129
3.1. Металлофиты ЦАМП.....	130
3.2. Комплексные подходы к исследованию фитогеохимии.....	132
4. Проблемы и возможности применения фитогеохимии.....	133
5. Выводы и направления будущих исследований.....	136

VII. ФИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ СКРЫТОГО W-Sn ОРУДЕНЕНИЯ <i>(рудный район Шичжюань, Китай)</i>	138
1. Введение.....	138
2. Материалы и методы.....	138
2.1. Район исследований.....	138
2.2. Сбор, подготовка и анализ проб.....	139
2.3. Контроль и оценка качества, анализ данных.....	140
3. Результаты.....	141
3.1. Характеристики микроэлементов в растениях.....	141
3.1.1 Оптимальное положение для отбора проб.....	141
3.1.2 Особенности поглощения микроэлементов из почвы.....	142
3.1.3 Индикаторные характеристики микроэлементов различных растений.....	143
3.1.4 Статистика геохимических параметров растений-индикаторов...	145
3.2. Многомерный статистический анализ.....	146
3.2.1 Кластерный анализ R-типа.....	146
3.2.2 Факторный анализ.....	147
4. Обсуждение.....	148
4.1. Факторы, влияющие на содержание микроэлементов в растениях.....	148
4.2. Результаты на основе выявленного оруденения и геологических данных.....	149
4.3. Ограничения и перспективы.....	150
5. Выводы.....	150
VIII. ПОИСК СКРЫТЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОГАЗА <i>(Китай)</i>	152
1. Введение.....	152
2. Концепция и принципы поисков металлов с использованием геогаза.....	152
2.1. Состав и морфология наноразмерных металлов в геогазе.....	154
2.2. Источники наноразмерных металлов в геогазе (NAMEG).....	157
2.2.1. Сравнение состава.....	157
2.2.2. Морфология наноразмерного Au в геогазе.....	159
2.2.3. Изотопный состав Pb.....	160
2.2.4. Структура редкоземельных элементов.....	162
2.2.5. Взаимосвязь между содержанием наноразмерных металлов в геогазе и в рудах.....	163
2.3. Факторы, влияющие на поиск металлов с использованием геогаза....	164
3. Образование нанометаллов в процессе минерализации.....	166
4. Миграция во вторичном процессе.....	167
5. Эффективность применения.....	170
5.1. Различные типы рудных месторождений.....	170
5.2. Различные геохимические ландшафты и климат.....	171
6. Выводы.....	173
ИСТОЧНИКИ:	174

СОВРЕМЕННЫЕ ПОРТАТИВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ 175

I. МИНЕРАЛЫ-ИНДИКАТОРЫ И ЭЛЕМЕНТЫ-НАВИГАТОРЫ, ПОРТАТИВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ.....	176
1 Минералы-индикаторы.....	176
2 Элементы навигаторы.....	177
3 Краткие сведения о портативных приборах, принципах их работы, компонентах, параметрах и особенностях применения.....	179
4 Портативные наземные аналитические приборы	179
4.1. Макроспектроскопия в видимом и инфракрасном диапазоне.....	180
4.2 Радиометрические приборы.....	184
4.3 Устройства рLIBS.....	190
4.4 Анализаторы μ Raman.....	194
4.5 Светодиодный флуориметр.....	197
5 Керновые сканеры.....	198
6 Сравнение портативных приборов с лабораторными.....	199
7 Проблемы с качеством данных и пути их преодоления.....	200
8 Выводы.....	202
II. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ПОРТАТИВНОГО рXRF ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ.....	204
1. Введение.....	204
2. Материалы и методы.....	204
2.1. Исследуемая территория и пробоотбор.....	204
2.2. Анализ рXRF.....	205
3. Результаты.....	206
3.1. Анализ с использованием рXRF.....	206
3.2. Влияние времени обнаружения на погрешность анализа.....	207
3.3. Надежность и стабильность рXRF	208
4. Обсуждение.....	209
5. Выводы.....	212
<i>ИСТОЧНИКИ:</i>	213

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА В ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ЦЕЛЯХ

Фундаментальной задачей региональной и локальной поисковой геохимии является точное различие между классами фона и аномалий. В настоящее время применяются методы пространственной статистики для выявления геохимических аномалий. Фрактальные/мультифрактальные методы способны учитывать как частотное распределение, так и пространственную изменчивость геохимических данных для идентификации геохимических объектов, связанных с рудой, и поэтому более применимы в сложных геологических условиях. Кроме того, фрактальные/мультифрактальные методы могут усилить слабые геохимические закономерности.

Геохимические аномалии обычно связаны с рудообразующими процессами, которые имеют сложные системы. С другой стороны, термодинамические составляющие, такие как тектоника, рудоносные флюиды и вмещающие породы, различаются в различных геологических средах. Более того, большинство рудных месторождений находятся глубоко под поверхностью и часто имеют «скрытый» характер. Для лучшего понимания и определения геохимических аномалий, связанных с оруденением, при поисках могут быть полезны статистические методы, основанные на алгоритмах машинного обучения (MLAs). В последние годы MLA продемонстрировали возможности в качестве практических инструментов при решении многосторонних вопросов, связанных с распознаванием образов и классификацией. Искусственные нейронные сети (ANNS), сети глубокого автокодирования, машины опорных векторов (SVM), самоорганизующиеся карты (SOM) и случайные леса (RF) являются примерами MLA, которые используются в поисковых целях.

В последнее время геохимические поиски сместили акцент на анализ данных. Анализ данных — это инновационная методология извлечения информации с учётом всех соответствующих геохимических переменных. Его цель — выявить корреляции между установленной минерализацией и геохимическими закономерностями.

Большое количество предыдущих исследований было сосредоточено на скрининге и проверке геохимических аномалий с высокой концентрацией, множеством элементов и большими размерами. По мере углубления поисков, можно обнаружить, что геохимические аномалии в минерализованных телах с большой глубиной залегания очень слабые, с низкой концентрацией и небольшими размерами; следовательно, они часто игнорируются. Требуются усовершенствованные методы обработки геохимических данных. Для выявления скрытых взаимосвязей и закономерностей геохимические наборы данных должны анализироваться с помощью таких методов, как факторный анализ, анализ главных компонент и др.

I. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В ПРОГНОЗНЫХ ЦЕЛЯХ (пояс Торуд-Шахширин, Иран) [1]

1. Введение

В этом исследовании была использована интегрированная методология, включающая модели SM и RF, для анализа геохимических данных о донных отложениях, собранных в Торудско-Шахширинском поясе (ТСВ), для обнаружения геохимических аномалий $\text{Cu} \pm \text{Au}$. Для этого первоначально использовались кривые успешности для определения эффективных геохимических показателей, связанных с минерализацией в исследуемой области. По результатам кривых успешности были использованы значения особенностей элементов Au, Cu, Pb и Zn для определения слабых геохимических аномалий.

В соответствии со сложными и многообразными геологическими условиями, присутствующими в исследуемом районе, модель RF как надежный алгоритм машинного обучения была разработана на основе значений особенностей эффективных геохимических сигнатур и структурных факторов, связанных с минерализацией (плотность и расстояние до разломов) для точного картирования перспективных площадей в исследуемом районе.

2. Исследуемая территория и используемый набор данных

Вулкано-интрузивный пояс Торуд-Чах Ширин (ТСВ) занимает площадь около 5000 км². Это часть магматической зоны Центрального Ирана (рис. 1).

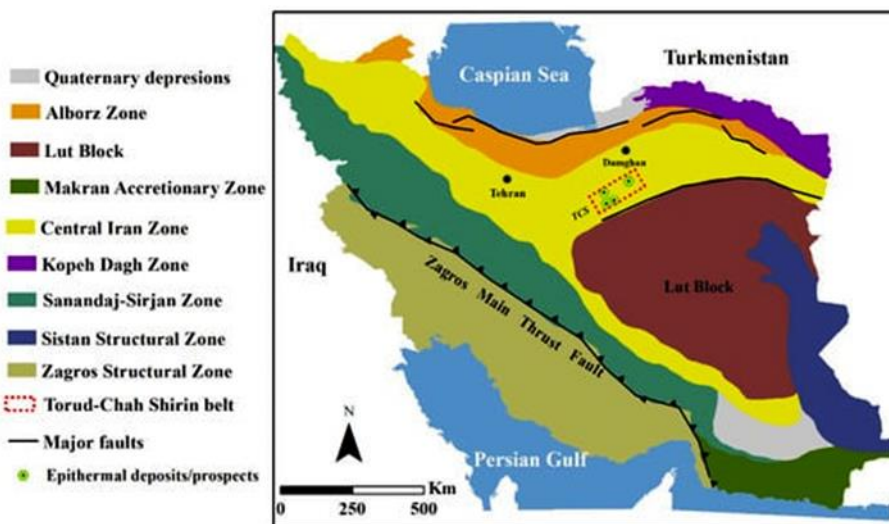


Рис. 1. Местоположение вулкано-интрузивного комплекса Торуд-Шахширин на северо-востоке Ирана.

Северо-западный тренд ТСВ действует как поднятый блок между региональными разломами Торуд и Анджилоу. Третичный известково-щелочной вулканизм и рудная минерализация происходили вдоль крупного разлома Анджилоу на севере и разлома Торуд на

юге. Тектонические процессы, особенно разломы и трещины, являются основными регуляторами рудообразующих систем в этом поясе.

Магматические породы включают граниты, микро-граниты, гранодиориты, микро-гранодиориты, микрокварц-монциты, микромонциты, микромонцодиориты и микрокварц-монцодиориты от субщелочной до щелочной серий и относятся к типу I. Кроме того, эти интрузивные тела рассматриваются как один из важнейших факторов процесса минерализации в районе. Есть несколько значительных рудных месторождений: Чешмех Хафез ($Pb + Zn + Cu$), Чах Месси ($Cu \pm Au$), Ганди ($Au-Ag \pm Pb-Zn$), Аболхассани ($Pb-Zn \pm Ag \pm Au$), Чало ($Cu \pm Au$), Дарестан ($Cu \pm Au$), Багу ($Au \pm Cu$), и др.

Геохимическая съемка речных отложений - были отобраны 1625 образцов донных отложений по сетке 1400×1400 м. (рис. 2).

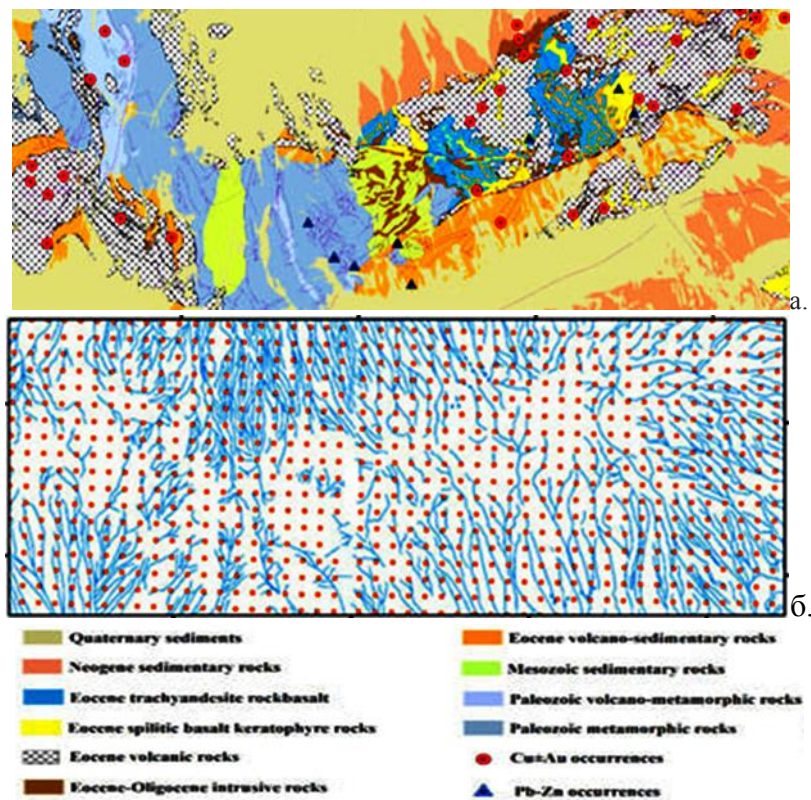


Рис. 2. Упрощенная геологическая карта ТСВ (а) и места отбора проб (б).

Каждая репрезентативная выборка была проанализирована методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) на основные и следовые геохимические элементы, за исключением Au, для которого был применен огненный анализ (FA) в качестве метода предварительного концентрирования. Затем были использованы методы атомно-абсорбционной спектроскопии (AAS) и концентрации шести индикаторных элементов (Au, As, Cu, Pb, Sb и Zn) эпитермального оруденения жильного типа.

3. Методология.

Идея сингулярности может быть схожа с процессами рудообразования, которые заключаются в высвобождении огромной энергии или сборе материала в пространственно-временном диапазоне. Следовательно, количественное измерение особенностей может быть важным инструментом для обнаружения скрытых и локальных геохимических аномалий.

С мультифрактальной точки зрения сингулярность может быть выражена через степенные соотношения. В 2D-модели, если количество металла в пределах области (A) равно $\mu(A)$, а средняя концентрация металла равна $C(A)$. поэтому его можно описать как $C(A)=\mu(A)/A$. Согласно соотношению $C(A)$, $\mu(A)$ и A имеют прямую зависимость (например, количество металла $\mu(A)$ увеличивается по мере увеличения площади A , и наоборот). Однако значения $C(A)$ полностью зависят от процессов рудообразования и от изменения площади, $C(A)$ может увеличиваться, уменьшаться или оставаться постоянным. Степенные зависимости между этими переменными:

$$\mu(A)=cA^{\alpha_2} \quad (1)$$

$$C(A)=cA^{\alpha_2-1} \quad (2)$$

где α указывает индекс сингулярности, а c является постоянным. α может быть достигнуто с помощью значений средней концентрации металла, которые измеряются для нескольких размеров территории методом наименьших квадратов.

Существуют три различных условия, основанные на α значения при 2D моделировании:

(1) $\alpha < 2$ обозначает аномальное обогащение элементом в определенном месте, (2) $\alpha > 2$ отображает истощение элементов в этой ситуации, и (3) $\alpha = 2$ иллюстрирует монофрактальное поведение в определенном местоположении.

Для расчета α для оценки каждого местоположения исследуемой территории и отображения результатов в виде геохимической карты может быть применен метод отображения особенностей, основанный на окне скользящего среднего. Во-первых, группа скользящих окон $A(r)$. Определяется (обычно квадратной формы) с различными размерами ($ri \times ri$). На следующем шаге алгоритм измеряет значения средней концентрации $C[A(ri)]$ для каждого окна, и, наконец, α индекс для каждого местоположения оценивается с помощью приведенного ниже уравнения:

$$\log C[A(ri)] = C + (\alpha - 2) \log (ri) \quad (3)$$

Ценность $(\alpha - 2)$ рассматривается как наклон из уравнения (3). Можно сделать вывод, что подход к картированию сингулярностей является надежной формой фрактальной техники "Концентрация-площадь".

3.1. Метод случайного леса.

Случайный лес (RF) является одним из методов ансамбля, который использует многочисленные деревья решений (DTs) для задач классификации и регрессии. Для обучения DTs, RF реализует метод начальной загрузки, который представляет собой метод повторной выборки. Это означает применение случайных выборок путем замены их помеченными данными—значениями, полученными на основе группы поисковых критериев в местах присутствия или отсутствия залегания полезных ископаемых. Другими словами, в процедуре начальной загрузки около 75% входных данных задействовано в процедуре обучения, а оставшаяся часть используется для вычисления ошибки обобщенных деревьев (out-of-bag error). Каждый DT обучается по случайной выборке исходных данных, а также разделяет целевую переменную на дихотомические классы. RF-алгоритм начинает очищать дочерние узлы от корневых посредством процессов разделения на основе множества входных переменных. Эта процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнут заданный критерий остановки. В конечном итоге регрессионная модель RF получается путем усреднения результатов нескольких DTs.

Выдающимся преимуществом RF как надежной версии DTs среди MLA является случайная повторная выборка и замена, которые заставляют применять несколько обучающих подмножеств для расширения DTs, следовательно, уменьшая корреляции между деревьями, а также повышая точность прогнозирования за счет уменьшения ошибки обобщения.

Что еще более важно, RF-алгоритм является удобным для пользователя и высокоэффективным алгоритмом машинного обучения благодаря небольшому количеству параметров. Есть два важных параметра, а именно *ntree* и *mtry*, которые оказывают наиболее значительное влияние на модель случайного леса. (a) *ntree* - это количество деревьев, которые нужно вырастить, и (b) *mtry* - это количество переменных, которые должны быть присвоены каждому узлу. Выбор огромного количества DTs (*ntree*) обычно повышает точность модели, но слишком большие значения переменной *mtry* могут привести к недостаточному соответствию. В связи с этим функция 'tuneRF' в пакете 'randomForest' была использована для достижения оптимальных значений параметров обучения (например, *ntree* и *mtry*), а также для уменьшения ошибки ООВ. Таким образом, использовалась модель RF с 215 в качестве количества деревьев и с 2 в качестве количества расколов.

Для измерения степени возможностей RF-модели в процедуре классификации была реализована матрица путаницы. Матрица путаницы состоит из четырех основных параметров, а именно: (1) *TP* (истинно положительный результат) представляет перспективные участки, которые правильно предсказаны, (2) *TN* (истинно отрицательный результат) показывает, что

модель правильно предсказала неперспективные участки, (3) FP (ложноположительный результат) и (4) FN (ложноотрицательный результат) иллюстрируют общее количество перспективных и неперспективных участков, соответственно, которые неправильно предсказаны. Общая точность (TA) модели RF определяется как отношение правильно предсказанных перспективных и неперспективных участков к общему числу прогнозируемых участков следующим образом:

$$TA = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4)$$

3.2. Кривые успешности.

Выбор эффективных критериев разведки (например, геохимических сигнатур или контролирующих геологических факторов) очень применим, поскольку участки с высоким уровнем благоприятствования могут быть распознаны с низкой неопределенностью. Другими словами, устраняя неэффективные критерии при моделировании минерализованных зон, можно получить достоверные результаты. Для этого были построены кривые успешности, чтобы показать эффективность карт фактических данных. Кроме того, эти кривые могут быть использованы для оценки эффективности различных моделей, связанных с месторождениями полезных ископаемых. Для построения кривой вероятности успеха ось x определяется как участок исследуемой территории, который классифицируется как благоприятный (P_a), а участок оруденения, который оценен правильно (P_o), отображается на оси y . Кроме того, на кривой успешности есть контрольная линия, которая характеризует успех или неудачу каждой карты фактических данных. Таким образом, если слой доказательств расположен выше калибровочной линии, это демонстрирует соответствие известным месторождениям в исследуемой области. И наоборот, слой доказательств представляет плохую взаимосвязь с известными месторождениями, когда он находится под калибровочной линией на кривой успешности.

4. Результаты и обсуждение.

4.1. Предварительная обработка выбранных элементов.

Первым шагом для применения различных статистических методов с целью выявления геохимических аномалий является определение типа распределения (например, нормального или логарифмически ненормированного) химических элементов. В связи с этим были рассчитаны основные статистические свойства, такие как стандартное отклонение, асимметрия и эксцесс исходных данных, относящихся к элементам, связанным с минерализацией, как показано в таблице 1.

Табл. 1.

Статистические параметры геохимических элементов, связанных с минерализацией.

	As	Au	Cu	Pb	Sb	Zn
N. of samples, valid	1625	1625	1625	1625	1625	1625
Maximum	85.4	604	1353	6637	24	5171
Minimum	4.3	0.3	10.71	8.86	0.21	36.63
Std. deviation	6.19	19.18	51.6	249.87	1.18	198.76
Skewness	4.6	25.98	15.37	18.83	10.9	18.25
Kurtosis	36.67	737.44	327.22	412.11	162.79	377.74

Результаты (основанные на параметре асимметрии) показывают, что значения геохимических элементов не соответствуют нормальной тенденции. С другой стороны, геохимические данные речных отложений выражены в виде систем замкнутых чисел, что означает, что они имеют композиционную природу. Следовательно, для решения проблемы замыкания и модуляции минимальных и максимальных значений геохимических данных были проведены преобразования логарифмического отношения. В связи с этим исходные данные по шести элементам, включая Au, As, Cu, Pb, Sb и Zn, были подвергнуты clr-трансформации. Преобразование clr подходит для открытия данных о составе в статистическом анализе из-за симметричных результатов и возможность интерпретации полученных значений.

С целью оценки нормальности clr-преобразованных данных были построены графики Q-Q (рис. 3) и выявлено, что в clr-преобразованных данных были некоторые отклонения.

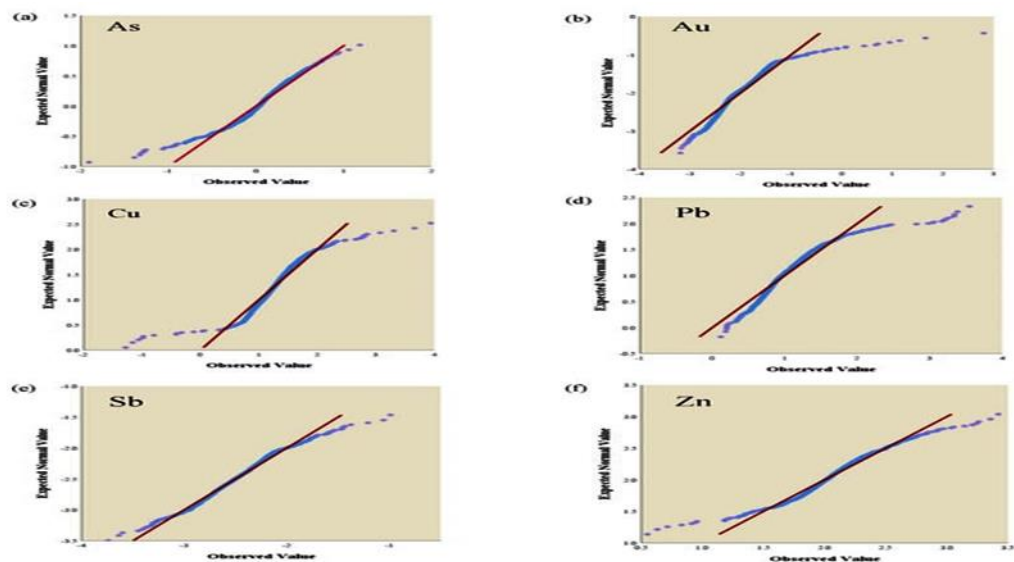


Рис. 3. Q-Q графики элементов, преобразованных clr: (a) As, (b) Au, (c) Cu, (d) Pb, (e) Sb и (f) Zn.

Можно сделать вывод, что концентрации элементов, связанных с минерализацией, демонстрируют фрактальные/мультифрактальные распределения с множественными геохимическими популяциями из-за сложных геологических процессов в ТСВ.

4.2. Извлечение эффективных одноэлементных геохимических следов.

С геохимической точки зрения идентификация геохимических аномалий в наборе данных о донных отложениях жизненно важна для способности каждого отдельного элемента обнаруживать целевые области.

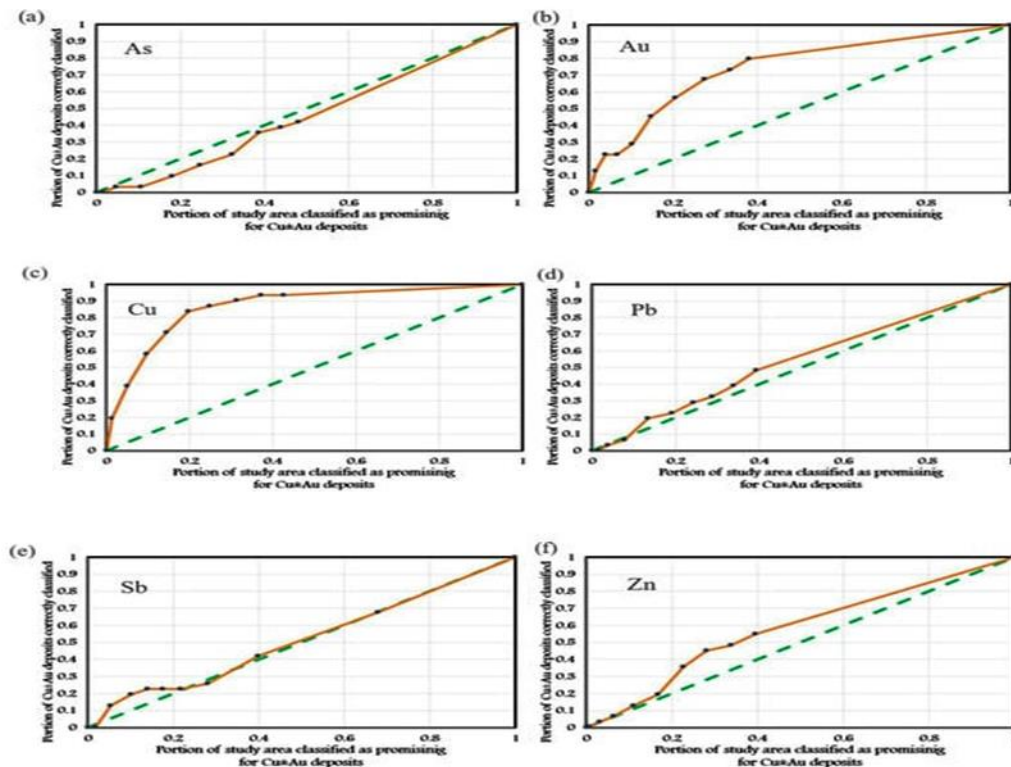


Рис. 4. Кривые успешности для преобразованных в clr: (a) As, (b) Au, (c) Cu, (d) Pb, (e) Sb и (f) Zn.

С этой целью были построены кривые успешности определения эффективных геохимических элементов, преобразованных clr (рис. 4а–f). Можно видеть, что геохимические значения Cu и Au демонстрируют устойчивую положительную взаимосвязь с известными залежами полезных ископаемых в УТС, поскольку кривые их успешности лежат за пределами калибровочной линии (рис. 4b, c). Pb и Zn классифицируются как умеренно эффективные геохимические элементы на основе кривых их успешности (рис. 4d, f), поскольку их классы аномалий не демонстрируют соответствующей взаимосвязи с месторождениями Cu-Au. Кроме того, Sb (рис. 4e) является наименее эффективным геохимическим элементом, поскольку кривая его успешности полностью лежит на диагональной линии. Наконец, одноэлементное значение As не отображало пространственных связей с местоположениями месторождений, поскольку его кривая успешности полностью расположена под калибровочной линией (рис. 4a).

4.3. Картографирование локальных геохимических аномалий.

После распознавания эффективных (наиболее, умеренных и наименьших) и неэффективных геохимических элементов, связанных с минерализацией в TCB, SM была

выполнена для геохимических значений Au, Cu, Pb и Zn, преобразованных $\lg$, чтобы выделить локальные аномалии (рис. 5).

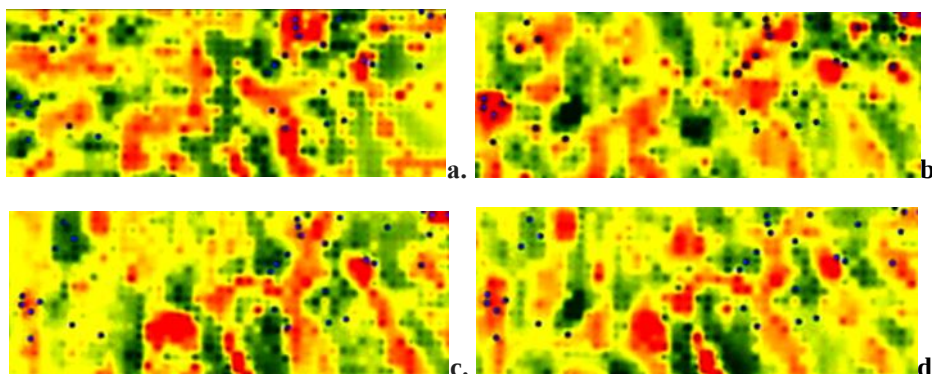


Рис. 5. Карты IDW значений α , связанных с: (a) Au, (b) Cu, (c) Pb и (d) Zn.

Однако при применении SM к геохимическому набору данных, преобразованному $\lg$, возникает проблема, которая состоит из отрицательных значений, что приводит к ошибочным результатам. Для решения этой проблемы первоначально был применен положительный сдвиг к преобразованным в $\lg$ значениям выбранных элементов с целью преобразования их в положительную область для использования при анализе особенностей.

Для применения алгоритма SM, во-первых, выбрали соответствующий размер ячейки (300м×300 м) для преобразования показателей геохимических элементов, преобразованных $\lg$, в растровую карту на основе структуры выборки (вместо плотности выборок). Затем была установлена группа квадратных раздвижных окон разных размеров (300 м×300 м, 600 м×600 м, ..., 1500 м×1500 м). Эти размеры были рассчитаны кратно размеру первой ячейки. После этого была вычислена средняя концентрация элементов с заданным размером ячейки для каждого окна. Затем индексы особенностей были получены путем применения метода наименьших квадратов duo к уравнению (3). В конечном итоге, для отображения значений индексов сингулярности был проведен IDW (рис. 5). Алгоритм SM был реализован в программе MATLAB R2031a.

4.4. Определение структурных контролирующих факторов.

Образование разломов являются местами миграции и выпадения гидротермальных флюидов. Эти пути и точки их пересечения контролируют важные факторы, такие как температура, давление и проницаемость, которые связаны с процессами минерализации.

Процессы минерализации и эволюция третичного вулканизма в поясе TCS напрямую зависят от систем разломов. Идентификация различных ориентаций разломов может быть доказательством специфической минерализации. В связи с этим в качестве тектонического контроля были выделены четыре основных тренда, включающие N-тренд, E-тренд, NE-тренд и NW-тренд (рис. 6).

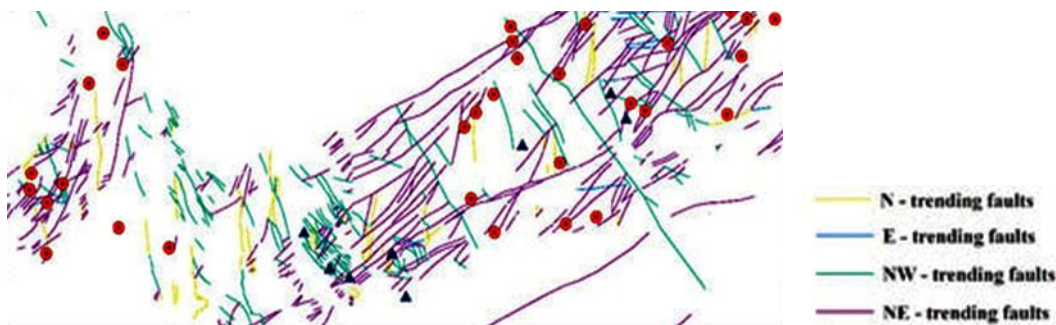


Рис. 6. Связь разломов с проявлениями ПИ в ТСВ.

Чтобы определить взаимосвязи между структурными факторами и оруденением, сгенерировали соответствующие карты расстояний до разломов в евклидовом порядке расстояний в программном обеспечении ArcMap 10.3. Для каждой ячейки было измерено евклидово расстояние до ближайшего источника. Кроме того, было установлено максимальное расстояние до края выходного растра (рис. 7а–д). Кроме того, была составлена карта плотности разломов как еще один тектонический контроль рудообразующих процессов в поясе ТСВ (рис. 7е).

Наконец, благодаря результатам построения кривых успешности, карты расстояния до разломов с мелким направлением и плотности разломов были признаны эффективными структурными слоями (рис. 7б, е).

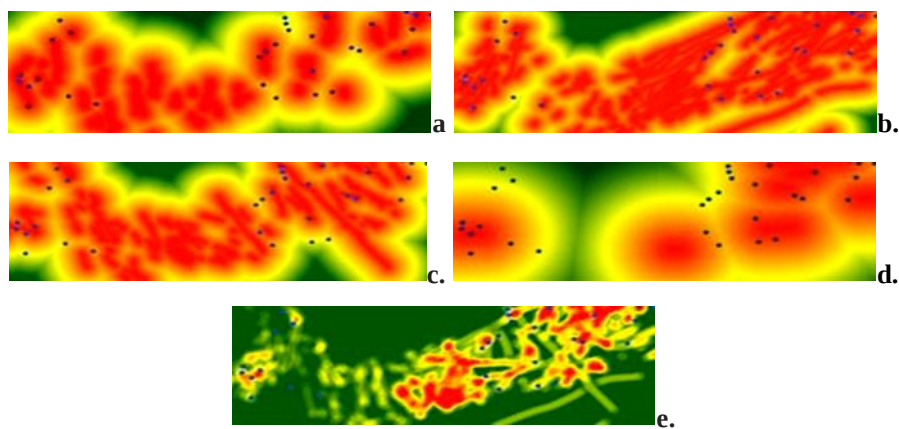


Рис. 7. Карты расстояний от разломов:
(а) N-направление, (b) NE, (c) NW, (d) E и (е) карта плотности разломов.

Результаты кривых успешности соответствуют предыдущим исследованиям в ТСВ. Например, эоцен–олигоценый вулканизм, возможно, сформировался вдоль участка разлома с северо-восточным направлением. Кроме того, некоторые известные месторождения (например, Ганди, Багу и Аболхассани) в поясе TCS в основном формируются параллельно северо-восточной линии. Таким образом, эти разломы (NE-trending) напрямую связаны с рудообразующими процессами в поясе TCS. Остальные направления (например, N-трендовое,

Е-трендовое и NW-трендовое) рассматривались как неэффективные структурные факторы (рис. 8a, c, d).

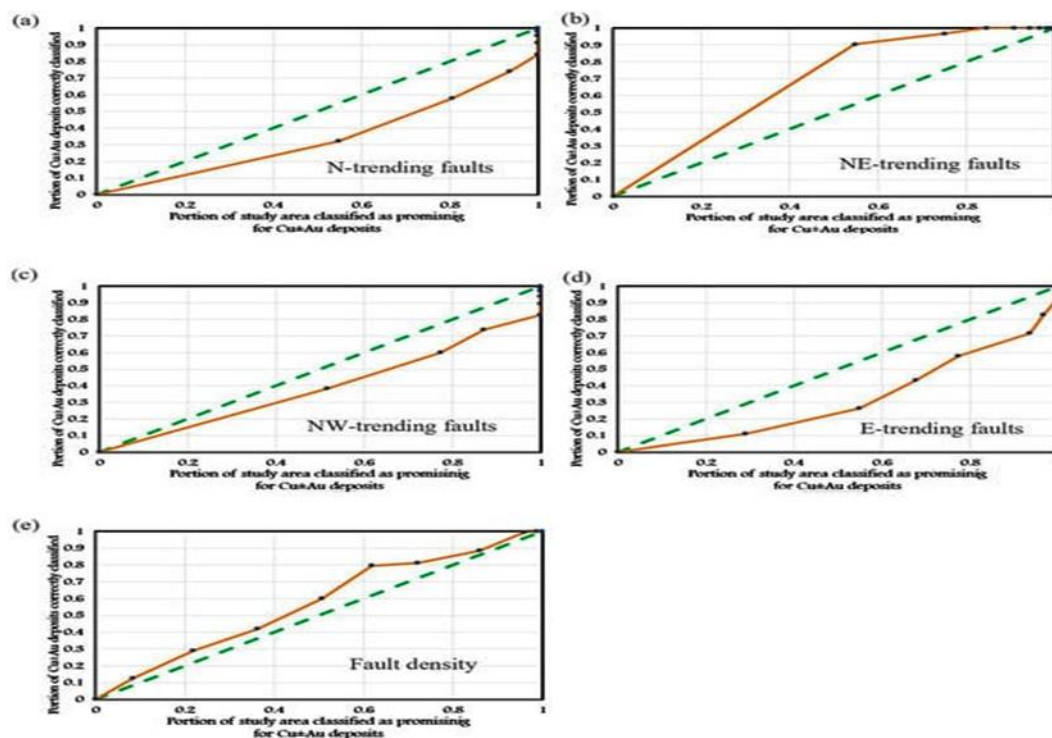


Рис. 8. Кривые успешности для различных разломов: (a) N, (b) NE, (c) NW, (d) E и (e) карта плотности

4.5. Модель случайного леса.

С целью извлечения геопространственных связей между геохимическими аномалиями и оруденением $\text{Cu}\pm\text{Au}$ был применен RF-алгоритм. С этой целью в качестве исходных данных для создания прогностической модели перспективности Cu-Au были использованы четыре эффективных геохимических слоя на основе SM (альфа-значения Au, Cu, Pb и Zn), а также два значимых структурных фактора (расстояние до разломов с северо-восточной тенденцией и плотность разломов). С этой целью из шести фактических карт было извлечено в общей сложности 65 583 пиксельных значения для получения тестовых и обучающих данных. Был создан обучающий набор данных на основе перспективных и неперспективных местоположений. Эти местоположения должны быть выбраны по следующим правилам:

1. Количество неперспективных участков должно быть равно количеству перспективных участков для повышения точности моделей
2. Чтобы дифференцировать набор данных с несколькими атрибутами, неперспективные участки должны быть выбраны вдали от перспективных участков (выбор неперспективных участков проводится на основе анализа точечной структуры, на расстоянии не менее 3 км от мест залегания).

3. В отличие от перспективных участков, которые регулярно группируются, неперспективные участки должны иметь произвольную природу.

Соответственно, был создан обучающий набор данных (2561 значение в пикселях), в котором целевые переменные были помечены как 1 - перспективные и 0 - неперспективные. Затем для обучения модели RF было выбрано около трех четвертей от общего количества значений (1920 пикселей) и остаток (641 пиксель), которые были применены в качестве готовых образцов (OOB) и не использовались для процедуры обучения. Образцы OOB использовались для оценки точности обученной модели. RF-алгоритм был выполнен с использованием программного обеспечения RStudio-2023.06.0+421.pro1 (табл. 2, рис. 9).

Табл. 2.

**Точность классификации и погрешность различных RF-моделей
для данных OOB на основе матрицы путаницы.**

	RF via Singularity Values
OBB error	1.15%
Model accuracy	98.85%
Error for the classification of deposit sites	1.13%
Error for the classification of non-deposit sites	3.03%

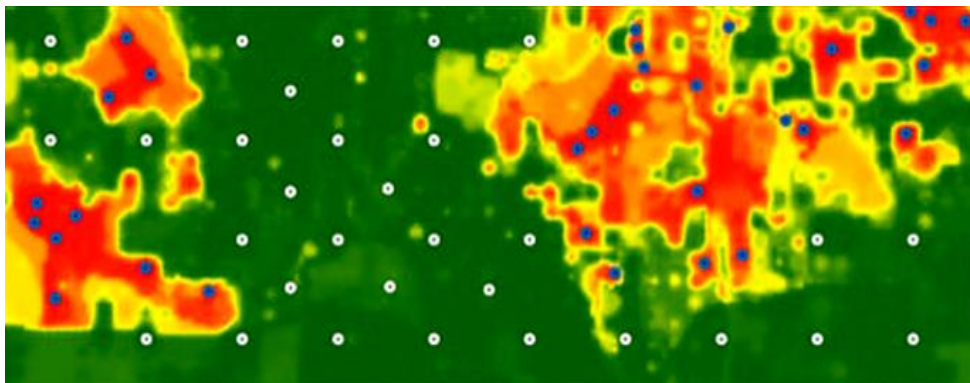


Рис. 9. Прогнозная карта потенциальной минерализации с помощью RF-модели и сингулярного анализа.

Ошибка OOB составила 1,15%, и, как следствие, точность RF-модели составила 98,85% (табл. 2), что демонстрирует правильность работы алгоритма. Кроме того, на основе матрицы путаницы точность классификации месторождений и участков, не являющихся месторождениями, для моделирования RF составляет 98,87% (ошибка = 1,13%) и 96,97% (ошибка = 3,03%) соответственно.

Наконец, как показано на рисунке 9, модель RF выявила взаимосвязь между районами с высоким уровнем благоприятствования и районами, состоящими из известных залежей $\text{Cu} \pm \text{Au}$.

4.6. Оценка модели перспективности.

Кривая успешности была применена для измерения надежности сгенерированной модели для определения производных объектов геохимических аномалий. Для повышения точности анализа были приняты интервалы в 5 перцентилей для построения кривой успешности модели RF.

Как видно на рисунке 10, кривая успешности RF-модели вышла за пределы калибровочной линии, и это означает, что прогностическая модель успешно получила положительную взаимосвязь с известными месторождениями/проявлениями $\text{Cu} \pm \text{Au}$.

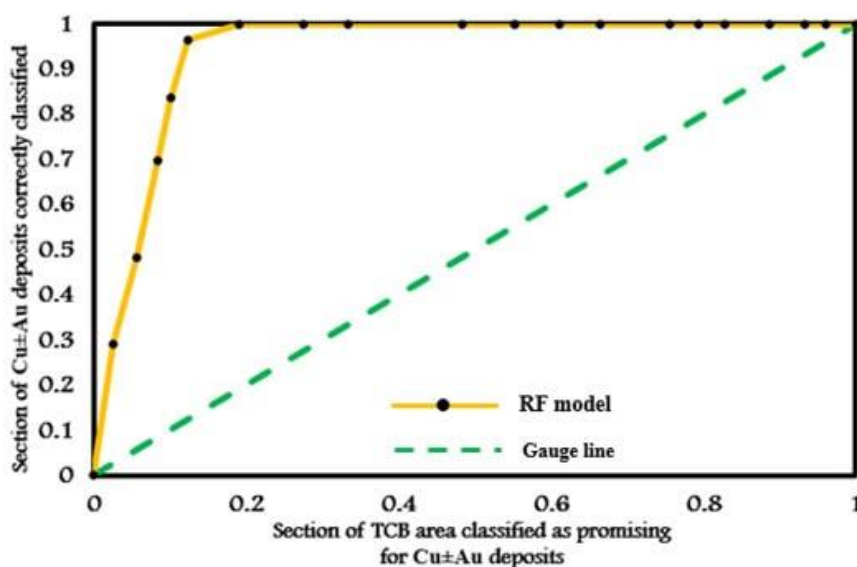


Рис. 10. Кривая успешности сгенерированной RF-прогностической модели месторождений $\text{Cu} \pm \text{Au}$.

4.7. Определение поисковых площадей методом *t*-Student.

Чтобы указать соответствующие пороговые значения для разделения геохимических аномалий, связанных с моделью RF, была использована пространственная статистика *t*-Student. *T*-значение Стьюдента, основанное на методе весовых коэффициентов, измеряет пространственную связь между геохимическими значениями и известным оруденением. Чем выше положительные значения *t*, тем более устойчивы положительные взаимосвязи между известными месторождениями и геохимическими аномалиями. Для разбиения карты на основе непрерывных значений особенностей на дихотомические значимые классы в качестве подходящего порога (0,8) для определения геохимических аномалий было выбрано самое высокое значение *t* Стьюдента (3,95) (рис. 11a). Геохимические объекты, расположенные на прогнозной карте, основанной на сингулярности, пространственно коррелируют с большинством известных месторождений в ТСВ (рис. 11b).

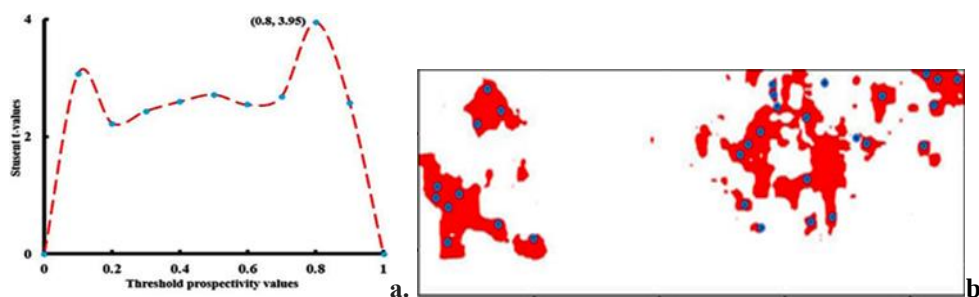


Рис. 11. (а) t -значения Стьюдента, измеренные для дискретизации прогностической модели.
(б) радиочастотная модель, основанная на дихотомических особенностях,

5. Выводы.

Была реализована RF-модель с эффективными геохимическими слоями на основе SM и критическими структурными критериями, направленная на выделение геохимических аномалий, связанных с эпитермальной минерализацией $\text{Cu} \pm \text{Au}$ в ТСВ. Результаты этого исследования:

1. Картирование особенностей в качестве метода фильтрации является успешным в выделении перспективных геохимических аномалий в УТС.
2. Прогнозирование поисковых площадей (точность = 98,85%) указывает на надежность и эффективность модели RF при отображении геохимических аномалий.
3. Модель перспективности RF (на основе метода t Стьюдента) представляет геохимические аномальные площади, совпадающие с месторождениями $\text{Cu} \pm \text{Au}$.

II. ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ В ПОИСКОВЫХ ЦЕЛЯХ (медно-порфировый район Дуобаошань, Китай) [4].

1. Введение

Геохимические методы разведки были доминирующими в разведке полезных ископаемых и количественном прогнозировании минеральных ресурсов. С 1970-х годов геологи в разных странах накопили большое количество многомасштабных и многоэлементных геохимических данных в процессе разведки полезных ископаемых. Обработка геохимических данных особенно важна, незаменима и имеет решающее значение в поисковой геохимии.

В текущем исследовании предложено несколько методов обработки геохимических данных для распознавания пространственных образов и выделения аномалий в моделях геохимических данных съемок, таких как обычный статистический анализ, методы статистики локальных разрывов, многомерный статистический анализ, анализ поиска данных, геостатистика, а также фрактальные и мультифрактальные методы, среди которых фрактальная и мультифрактальная теория идентификации аномалий и извлечения является методом обработки, который был предложен и быстро и эффективно развивался в последние годы.

Концепция "фрактальной геометрии" была создана в 1983 году. Она была применена к анализу сложных явлений, за которым последовали несколько смежных исследований, предполагающих, что пространственное распределение и частоты геохимических элементов могут подчиняться самоподобию во фрактальных моделях. Для выделения геохимических аномалий была предложена серия фрактальных локальных методов: фрактальная модель "концентрация–площадь" ($C-A$), фрактальная модель "концентрация–объем" ($C-V$), фрактальная модель "площадь спектра" ($S-A$), фрактальная модель фрактальная модель пространств признаков с собственными значениями ($N-\lambda$) и аналогичная фрактальная модель пространства Уолша. Эти методы не только учитывают распределение глубинной информации о геохимических полях, но также учитывают пространственную корреляцию, геометрические закономерности и масштабную инвариантность, тем самым обеспечивая эффективную декомпозицию сложных в дополнение к глубоким фоновым и наложенным аномалиям в комплексной геохимии. Изучение и количественный анализ фрактальных и мультифрактальных геохимических данных позволяет извлечь информацию о слабо проявленных геохимических аномалиях, которые трудно идентифицировать в сложных геологических условиях, что позволяет понять закономерности распределения геохимических элементов. В настоящее время фрактальные и мультифрактальные методы обработки геохимических данных широко используются при поисках.

С развитием цифровизации требования к способности идентифицировать геохимические аномалии постепенно возрастают. Предложен метод преобразования логарифмического отношения для улучшения способности распознавания геохимических аномалий, поскольку геохимические данные обычно представляют собой данные о составе – пространство Эйтчисона. В методах обработки данных геохимических съемок, их геометрическое пространство основано на евклидовом пространстве, поэтому использование логарифмических преобразований для преобразования компонентных данных в соответствующее пространство может помочь в более точном выявлении и разложении геохимических аномалий. Многие исследования показали, что метод преобразования логарифмического отношения может более эффективно выявлять истинные схемы пространственного распределения элементов, и устранение эффекта замыкания данных геохимических съемок. Распространенные методы преобразования логарифмического отношения включают аддитивное логарифмическое отношение - преобразование (ALR), центрированное логарифмическое отношение - преобразование (CLR) и изометрическое логарифмическое отношение - преобразование (ILR).

2. Геология района.

Район Дуобаошань в провинции Хэйлунцзян расположен на северной оконечности полиметаллического металлогенического пояса Восточный Уджимцинь Баннерно–Ненцзян. В течение поисков в этом районе было выявлен ряд месторождений (рис. 1).

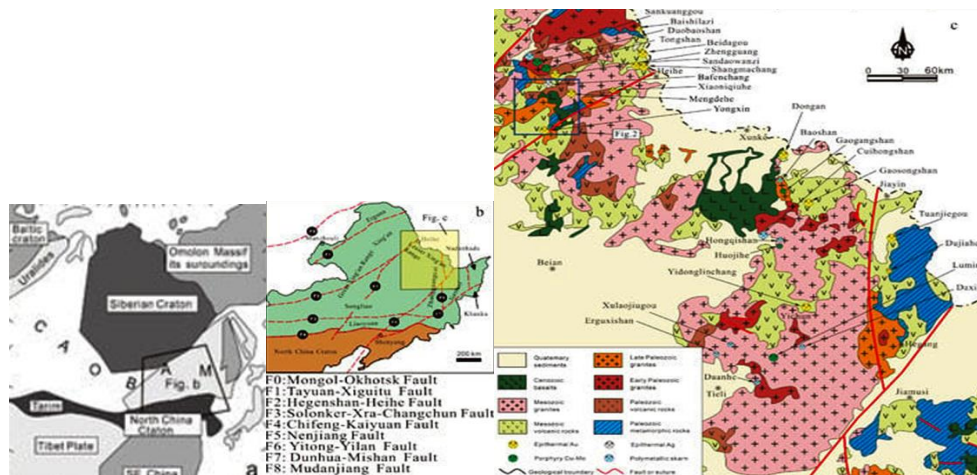


Рис. 1. (a, b) тектонические схемы СВ Китая и (с) геологическая карта Малого Синяньского хребта.

Исследуемый район расположен на восточной оконечности Центрально азиатского орогенного пояса (рис. 1а), на слиянии Большого и Малого хребта Синъянь (рис. 1б). Северо-восточный хребет Большого Синъяня представляет собой сложную тектоническую зону, которая претерпела длительную и магматическую и тектоническую эволюцию, со сложной

серией микроплитных переходов между Сибирской и Северо-Китайской плитами. Район Малого Синъяньского хребта характеризуется развитием вулканических, метаморфических и интрузивных пород разного возраста. В последние годы были обнаружены различные крупные и средние месторождения, такие как порфировые медно-молибденовые месторождения в Туншане и Дуобао Шане; железо-медные (молибденовые) месторождения кремнеземного типа, такие как в Цуйхуншане и Сюлаоцзюгоу; и низкотемпературные гидротермальные месторождения Au, такие как Чженгуан, Сандаованзи и Туаньцзегоу (рис. 1с). Этот район обладает также большим металлогеническим потенциалом на золото - были обнаружены месторождения Юнсинь, Мендехэ, Бафенчан и многие другие. Большинство месторождений расположены на пересечении основных разломов СВ ориентировки и вторичных структур, ориентированных на СЗ, и обычно сопровождаются гидротермальными изменениями, такими как окремнение, пиритизация, хлоритизация и карбонатизация.

Из-за геологической сложности района и многофазного характера минерализации геохимические данные обычно не удовлетворяются единой формой статистического распределения, поэтому традиционные статистические методы плохо подходят для выявления и идентификации распределения минерализации в геохимических данных. В этом исследовании 14 элементов, Ag, As, Au, Bi, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, W и Zn в геохимических почвенных данных масштаба 1:50 000 из района Дуобаошань были обработаны на основе многомерного компонентного анализа данных и пространственного распределения, а также внутренних структурных характеристик исходных данных, логарифмических данных и преобразованные в ILR данные сравнивали с использованием данных (EDA). Для получения комбинаций основных компонентов PC1 и PC2, связанных с минерализацией исследуемой территории, был применен анализ основных компонентов (RPCA). Фрактальная модель spectrum–area (S-A) была дополнительно использована для декомпозиции составных геохимических аномалий основного компонента PC1 и PC2, таким образом, более эффективно выявляя истинную картину пространственного распределения геохимических элементов в исследуемом районе, предоставляя идеи и направления для дальнейших поисков полезных ископаемых в этом районе.

3. Используемые методы и полученные результаты.

3.1. Сбор и обработка данных.

Геохимические данные взяты из опробования почвы в масштабе 1:50 000 на площади в 1334 км². Всего было собрано 10 314 образцов почвы. Плотность отбора составляла 9 проб на км². Слой отбора - слой В, глубина отбора - 30-80 см. Образцы были обработаны до 200 меш.

Методы анализа на четырнадцать элементов, Ag, As, Au, Bi, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, W и Zn приведены в таблице 1.

Табл. 1.

Методы и параметры анализа.

Element	Analysis Method	Detection Limit	Precision (RSD%)
Ag	ES	0.02 mg/kg	5.32
As	AFS	0.20 mg/kg	4.98
Au	GAAS	0.30 mg/kg	4.39
Bi	AFS	0.03 mg/kg	4.71
Cu	XRF	1.00 mg/kg	4.54
Hg	AFS	0.01 mg/kg	6.72
Mn	XRF	5.60 mg/kg	2.49
Mo	ES	0.24 mg/kg	6.99
Ni	XRF	2.80 mg/kg	1.31
Pb	XRF	1.50 mg/kg	3.67
Sb	AFS	0.05 mg/kg	5.37
W	POL	0.31 mg/kg	4.92
Zn	XRF	3.00 mg/kg	2.59
Fe	XRF	0.05 mg/kg	2.22

Преобразование логарифмического соотношения и анализ главных компонент.

Геохимические данные являются типичными данными о составе. Сумма всех содержаний элементов в композиционных данных представляет собой постоянную величину, известную как “эффект замыкания”. Эффект замыкания может привести к псевдокорреляции между геохимическими переменными, что делает результаты методов обработки данных, основанных на корреляциях между элементами, неопределенными. Большинство данных о составе не соответствуют характеристикам нормального распределения; в традиционных геохимических исследованиях часто выбирается логарифмическое преобразование, чтобы они соответствовали характеристикам нормального распределения. Однако эффект замыкания влияет на логарифмически преобразованные данные и не позволяет получить комбинации элементов с четким указанием минерализации. Использовались преобразования ALR и CLR для преодоления эффекта замкнутости в данных о составе. Преобразование ILR, основано на предположении, что пространству выборки задана евклидова геометрия. Преобразование логарифмического отношения устраняет эффекты замкнутости в данных о составе путем преобразования исходных геохимических данных из геометрии данных о составе в евклидово пространство.

По сравнению с неизометрическими преобразованиями, ALR и CLR, переменные в евклидовом пространстве изменятся после преобразования; преобразование ILR может гарантировать, что относительное расстояние между переменными до и после преобразования компонентных данных остается неизменным и более подходит для обработки компонентных данных. Однако этот метод является асимметричным, и соответствие между переменными будет нарушено после преобразования ILR, поэтому преобразованные переменные не могут быть интерпретированы напрямую. Использовалась комбинация преобразования ILR и анализа

главных компонент (RPCA), в которой ILR преобразует исходные данные, которые затем анализируются с использованием метода RPCA для получения оценок основных компонент, а также нагрузок, а затем преобразует их в систему координат CLR с использованием стандартного обратного ортогонального базиса. Затем данные преобразуются в систему координат CLR для установления взаимосвязи с исходными переменными. Таким образом, решена проблема несоответствия переменных после преобразования ILR. Более того, по сравнению с традиционным анализом главных компонент, RPCA основан на надежной статистике, которая может подавлять влияние выбросов в геохимических данных на результаты анализа главных компонент путем построения надежной ковариационной матрицы. В настоящем исследовании используется формула преобразования ILR, как показано ниже:

$$CLR(x) = \ln \frac{x_i}{\left\{ \prod_{j=1}^D x_j \right\}^{\frac{1}{D}}}, i = 1, 2, \dots, D$$

$$ILR(x) = \sqrt{\frac{i}{i+1}} \ln \frac{\sqrt[i]{\prod_{j=1}^i x_j}}{x_{i+1}}, i = 1, 2, \dots, D-1$$

1, 2

Фрактальная модель спектральной области.

Использован фрактальный метод разложения составных и наложенных аномалий, разработанный на основе принципа обобщенного самоподобия, который также известен как фрактальная модель области спектра (S-A) или метод фрактальной фильтрации. Геохимическое поле подчиняется самоподобию между индексами и шкалами, и конкретные геологические процессы или явления, имеющие пространственное значение, обычно реагируют на фракцию самоподобием. В пространстве частотной области метод S-A основан на этом самоподобии для построения фрактального фильтра и инвертирования отфильтрованной фракталом информации обратно в пространственную область с использованием преобразования Фурье для получения разложенных карт фона и аномалий. Выражение S-A показано ниже:

$$A(\geq S) \propto S^{-\beta}$$

3

где S отражает плотность спектра; $A(\geq S)$ отражает область в пространственной области, где плотность энергетического спектра больше S; и β - экспоненциальный коэффициент.

Когда спектральная плотность энергии (S) больше, чем спектральная плотность ($A(\geq S)$) в пространственной области, подчиняющейся экспоненциальной зависимости, тогда они одновременно берутся логарифмически и наносятся на логарифмический график. На построенном графике $\ln S - \ln A(\geq S)$ могут быть отражены различные линейные и фрактальные взаимосвязи в соответствии с различиями между интервалами, где берется S, и различиями

между прямолинейными сегментами при использовании интервалов. Распределение демаркационных точек используется для определения порога фрактального фильтра.

3.2 Многомерный компонентный анализ.

Результаты элементного анализа 10 314 образцов почвы, собранных в пределах исследуемой территории, были проанализированы с использованием программного обеспечения SPSS и R. Геохимические характеристики 14 элементов обсуждались в соответствии с их средними значениями и стандартными отклонениями (табл. 2), и исходные данные, данные, преобразованные в журнал, и данные, преобразованные ILR, были статистически проанализированы для выявления статистических закономерностей между элементами. Метод поискового анализа данных (EDA) также использовался для визуализации данных с использованием прямоугольных графиков, гистограмм плотности и графиков с двойными метками, чтобы можно было быстро и точно получить внутреннюю структуру и характеристики рассеивания данных.

Табл. 2.
Статистика исходных и логарифмически преобразованных и данных проб исследуемой области.

Element		Ag	As	Au	Bi	Cu	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	W	Zn	Fe
Minimum percentiles		0.04	1.00	0.10	0.05	3.20	0.01	85.00	0.25	3.10	9.00	0.04	0.27	15.00	0.59
	25%	0.07	8.30	0.70	0.30	18.90	0.03	658.00	0.80	22.40	23.20	0.49	1.76	62.70	3.57
	50%	0.08	9.80	1.00	0.34	22.50	0.03	972.00	0.96	25.70	25.60	0.57	1.96	73.50	3.96
	75%	0.10	12.10	1.50	0.38	25.90	0.04	1228.00	1.18	29.60	28.40	0.69	2.17	84.60	4.34
Maximum		3.58	151.20	1309.50	23.04	193.50	1.22	6865.00	108.90	194.20	228.60	12.89	50.86	347.00	8.67
Std		0.08	5.35	17.60	0.36	8.57	0.02	455.00	1.50	8.85	5.94	0.30	1.11	18.80	0.63
Mean		0.09	10.70	1.74	0.37	23.40	0.03	977.00	1.11	26.70	26.20	0.62	2.06	75.30	3.93
Raw	Skew	17.77	9.22	66.50	37.28	4.82	22.19	1.42	42.38	5.20	8.55	13.11	22.75	2.32	-0.27
	Kurt	547.06	169.66	4655.68	1966.62	55.15	930.34	9.08	2682.53	68.48	195.55	379.33	765.61	17.65	2.28
log10	MAD	0.02	2.67	0.59	0.06	5.19	0.01	418.09	0.28	5.34	3.85	0.13	0.31	16.16	0.58
	Skew	2.27	0.44	1.41	2.13	0.16	0.64	-0.76	2.04	-0.17	1.17	0.96	1.68	0.16	-1.58
	Kurt	9.72	6.05	7.40	19.70	4.03	5.89	0.60	13.43	5.32	9.64	7.87	19.51	2.63	7.41
	MAD	0.10	0.11	0.23	0.07	0.10	0.13	0.18	0.13	0.09	0.06	0.11	0.07	0.10	0.06
ILR	Skew	1.78	0.50	1.45	2.43	0.66	0.77	-0.73	1.86	0.67	0.12	0.94	1.87	0.41	-0.66
	Kurts	7.32	4.38	8.30	20.50	4.11	5.52	0.42	12.05	6.63	2.30	8.69	15.45	0.85	4.22
	MAD	0.24	0.26	0.49	0.15	0.19	0.28	0.44	0.28	0.17	0.18	0.22	0.16	0.23	0.15

Значение медианного абсолютного отклонения (MAD) отражает медиану абсолютного значения новых данных, полученных путем вычитания медианы из исходных данных. Среднее значение и стандартное отклонение данных подвержены выбросам и менее стабильны, тогда как MAD, основанный на надежной статистике, меньше подвержен выбросам, более стабилен и точнее представляет центр обработки данных и степень рассеивания данных. В таблице 2 видно, что значения MAD исходных данных сильно варьируются в среднем значении и стандартном отклонении содержания элементов. Этот результат также отражает разницу в пространственном распределении различных элементов из-за влияния различных геологических элементов исследуемой области.

Из прямоугольного графика (рис. 2а) видно, что асимметрия и эксцесс исходного набора данных слишком высоки, чтобы соответствовать требованиям нормального распределения;

пространственный масштаб исходного набора данных велик, данные разбросаны, а некоторые элементы имеют большое количество дискретных точек с высоким значением. По сравнению с исходным набором данных, преобразованные в логарифмическом формате и ILR-преобразованные данные (табл. 2 и рис. 2b, c) демонстрируют существенно меньшую изменчивость в масштабе распределения элементов, и данные по каждому элементу лежат по существу на том же порядке величины; асимметрия элементов и пиковое состояние были значительно улучшены, смещение и эксцесс элементов приблизились к нормальному распределению. Кривая плотности (рис. 3) также показывает распределение с одним пиком. Напротив, исходные данные не показывают соответствующей кривой плотности из-за больших различий в масштабе; преобразованные элементные данные однородны, и данные имеют тенденцию к центрированию, что в большей степени соответствует требованиям многомерного статистического анализа.

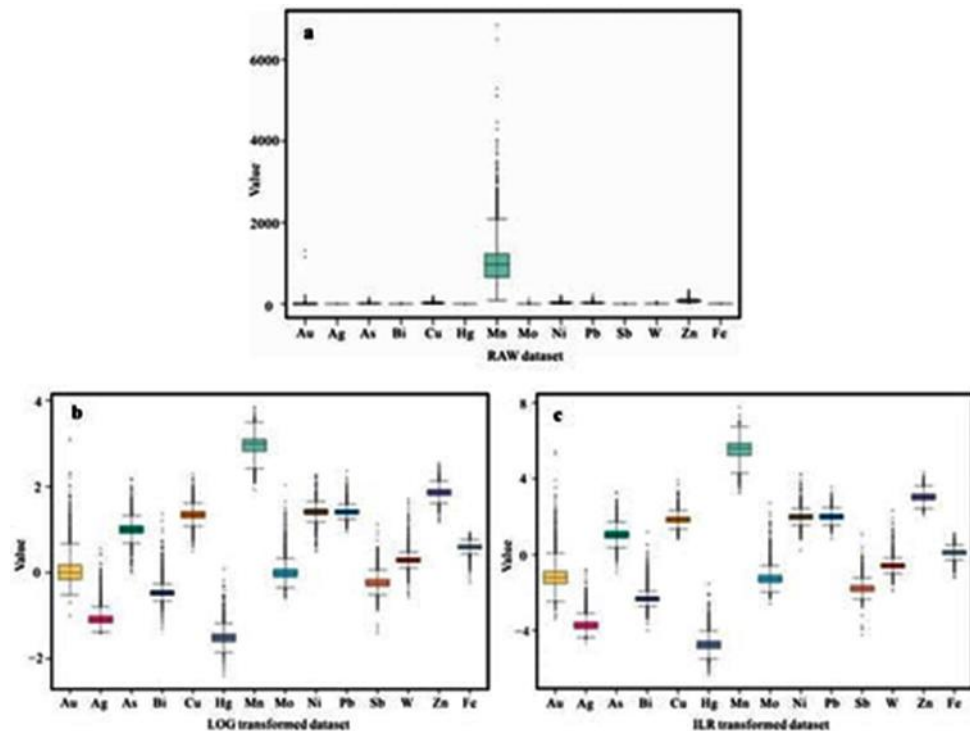


Рис. 2. Прямоугольные графики: (а) необработанных, (b) логарифмически преобразованных и (с) ILR-преобразованных наборов данных.

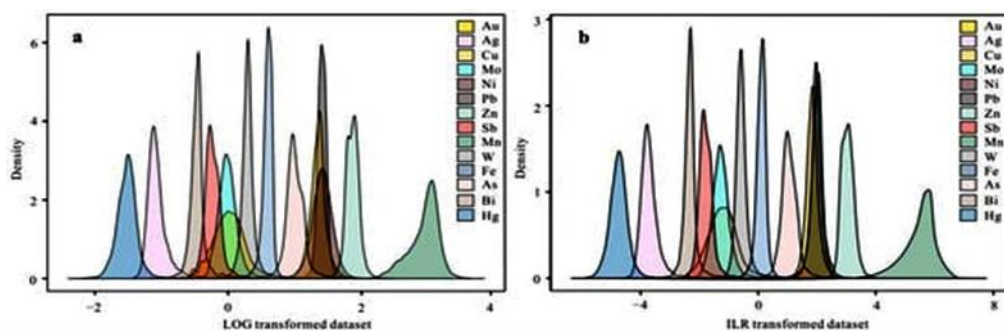


Рис. 3. Кривые плотности: (а) логарифмически и (б) ILR-преобразованных наборов данных.

Чтобы лучше изучить закономерности корреляции и совместной ассоциации между элементами в исследуемой области, результаты анализа главных компонент (PCA) визуализированы в этом исследовании путем объединения графиков метода EDA (рис. 4).

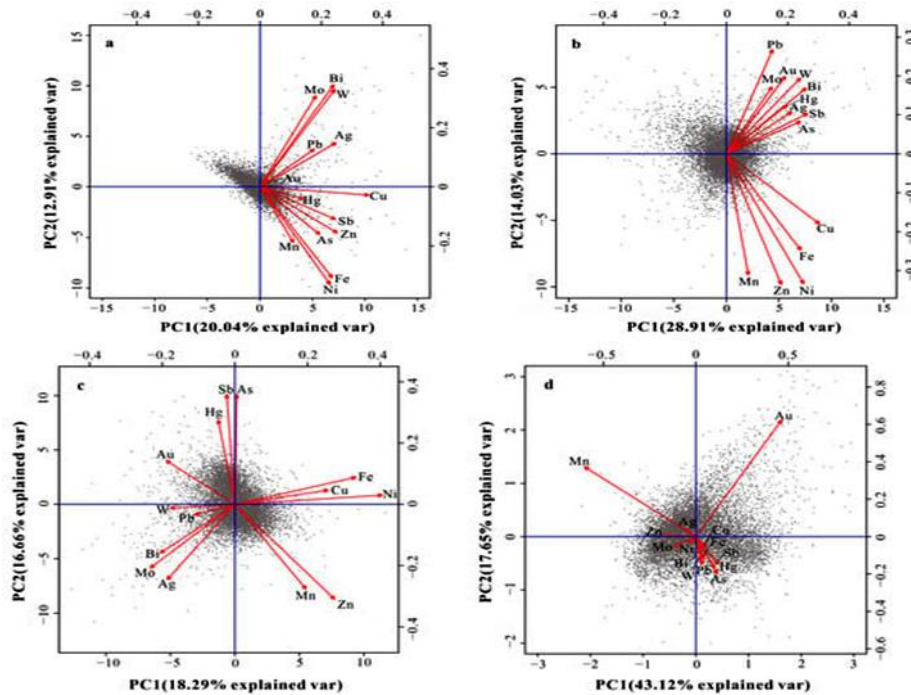


Рис. 4. Биплоадки PC1 и PC2 были получены с помощью необработанного набора данных с PCA (a) и логарифмически преобразованного набора данных с PCA (b) и преобразованного ILR набора данных с PCA (c) и преобразованного ILR набора данных с RPCA (d).

Из рисунка 4a, b видно, что исходные данные и логарифмически преобразованные данные имеют положительную нагрузку на все элементы в главном компоненте PC1, и никакой информации о корреляции между элементами получить невозможно. В отличие от основного компонента PC2, два показывают лишь незначительные различия, и результаты анализа главного компонента ограничены эффектом закрытия данных. Для данных, основанных на преобразовании ILR (рис. 4c, d), после PCA и RPCA переменные были активными, эффект замыкания был явно устранен, и взаимосвязь между преобразованными данными была намного более четкой. Они также указывают на то, что основные компоненты, полученные этим методом, являются более репрезентативными, при этом Au, As, Cu, Fe, Hg, Pb и Sb демонстрируют положительные нагрузки в основном компоненте PC1, а Au, Ag, Mn и Zn демонстрируют положительные нагрузки в основном компоненте PC2, причем Au является наиболее дискретным элементом, а также имеет высокие нагрузки как в основных компонентах PC1, так и в компонентах PC2, что указывает на то, что Au является основным компонентом PC1. основной рудообразующий металл, и что основные компоненты PC1 и PC2 могут отражать комбинацию элементов, связанных с минерализацией Au.

На основе двухплоскостного анализа в этом исследовании построены точечные графики оценки основных компонентов для данных оценки основных компонентов PC1 и PC2, полученных из RPCA с использованием преобразованных данных ILR. Согласно карте баллов по основным компонентам (рис. 5), можно видеть, что оценки по основным компонентам PC1 в западной части исследуемой территории ниже по сравнению с восточной частью.

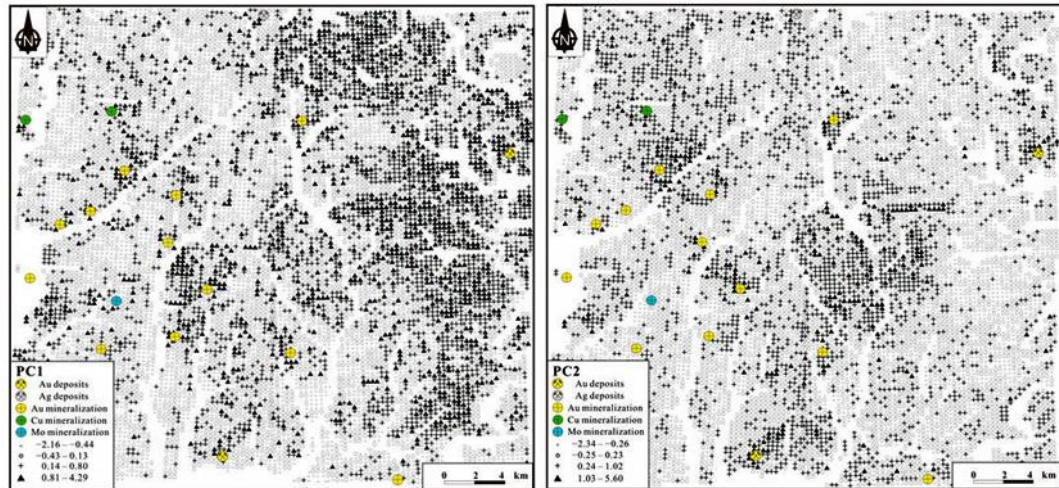


Рис. 5. Карты оценки первого и второго компонента RPCA.

Напротив, области с более высоким показателем на востоке сосредоточены над базальтом Даксюншань, что указывает на то, что в этом районе может быть более высокий фон его влияния. В то же время этот высокий фон, создаваемый базальтом восточного Дасюншаня, может препятствовать выявлению слабых аномалий в западной части исследуемой территории. В баллах по основным компонентам PC2 зоны с высоким баллом относительно дискретны, в основном перекрывают раннемеловые вулканические, субвулканические породы и каменноугольные граниты с хорошим совпадением и пространственной корреляцией с известными месторождениями, возможно, в результате магма-гидротермальной минерализации.

3.3 Анализ фрактальной модели спектральной области.

Для устранения влияния таких факторов, как минерализация и региональная геология, и, таким образом, более точного декодирования информации о геохимических аномалиях, данные основных компонентов PC1 и PC2 из оценки RPCA на основе преобразования ILR были дополнительно отобраны для обработки интерполяции по кригингу и S-A-декомпозиции. Модель S-A была реализована с помощью системы количественного прогнозирования минеральных ресурсов Geodas, разработанной Китайским университетом наук о земле. Данные о показателях основных компонентов PC1 и PC2 были преобразованы в частотную область с помощью преобразования Фурье, и взаимосвязь между энергетической спектральной

плотностью (S) и совокупной площадью (A) была получена на построенной кривой $\ln S - \ln A (\geq S)$. В соответствии с характером изменения обоих параметров была выполнена линейная подгонка на основе наименьшего количества квадратов, чтобы разделить значения энергетической спектральной плотности данных на различные интервалы значений в соответствии с наклоном подгонки (количество подразмерностей). На графике $\ln S - \ln A (\geq S)$ главного компонента PC1 (рис. 7a) линия $y = -2.09x + 17.10$ представляет поле шума, линия $y = -1.69x + 14.98$ представляет поле аномалий, а линия $y = -1.55x + 14.06$ представляет фоновое поле. На графике $\ln S - \ln A (\geq S)$ главного компонента PC2 (рис. 7b) линия $y = -2.21x + 17.05$ представляет шумовое поле, линия $y = -1.76x + 14.86$ представляет аномальное поле, а линия $y = -2.10x + 17.05$ представляет фоновое поле.

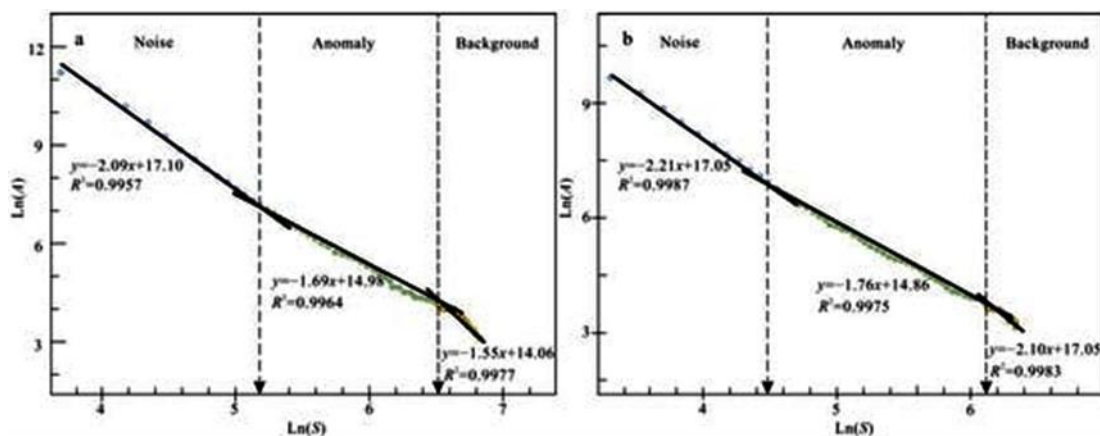


Рис. 6. Логарифмические графики значений спектра мощности S в зависимости от области со спектром мощности, превышающим S , для основного компонента набора данных $\log = \text{ratio}$ из PC1 (a) и PC2 (b).

Фоновое поле, полученное методом S-A декомпозиции, в основном отражает фоновый состав массовых долей элементов; области с высоким фоном могут быть благоприятными для поисков полиметаллических объектов; колебания интенсивности фона отражают присутствие элементов в благоприятном геологическом контексте для минерализации, а поле аномалий в основном отражает локальные молекулы элементов с аномальной массой и шум, генерируемый во время обработки данных. Соответственно, карты фона и аномалий, соответствующие основным компонентам PC1 и PC2 оценки RPCA, были составлены на основе аномалий и фоновых полей, определенных выше (рис. 7). После декомпозиции фоновая карта основного компонента PC1 (рис. 7b) отражает различия между востоком и западом района Дуобаошань, и в сочетании с геологическими условиями исследуемого района можно увидеть, что область с высоким фоном расположена над базальтом Даксюншань. Напротив, известные месторождения расположены над зоной с низким фоном. Оставшиеся аномалии главного компонента PC1 (рис. 7a) были получены после удаления фоновых аномалий, что не только уменьшило масштабы аномалий в восточной части исследуемой территории, но и увеличило силу локальных

аномалий в западной части исследуемой территории, выделив слабую аномальную информацию, которая скрыта в зоне с низким фоном в западной части исследуемой территории.

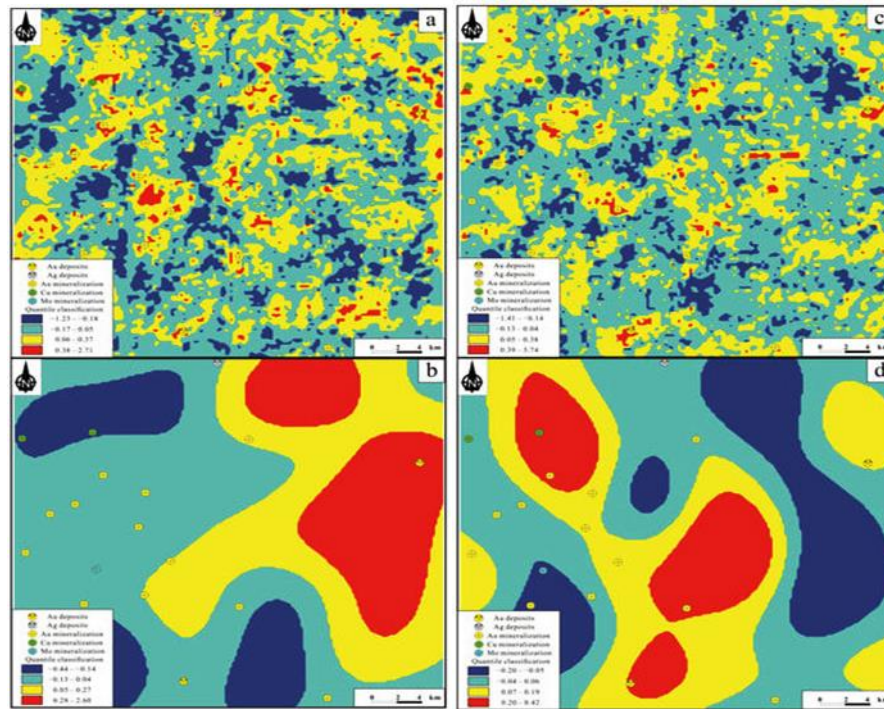


Рис. 7. Карты аномалий и фоновых компонент PC1 (a, b); PC2 (c, d).

В то же время известные месторождения расположены вблизи областей аномалий с высоким значением. В сочетании с геологическими условиями исследуемого района фоновая карта разложившегося основного компонента PC2 (рис. 7d) показывает, что фоновая область контролируется трещинами и интрузивными породами. Аномалия с высоким фоном расположена над позднекаменноугольным гранитным милонитом; аномалия разложения (рис. 7c) тесно связана с породами, и распределение аномалии основного компонента PC2 с разложением в некоторой степени аналогично аномалии основного компонента PC1 в областях средней и высокой аномалий; оба распределены вблизи известных месторождений Au и имеют некоторую пространственную корреляцию. Это дополнительно иллюстрирует информацию об аномальной минерализации, отраженную в основных компонентах PC1 и PC2, в которых преобладает минерализация Au. Что касается построенной $\ln S - \ln A (\geq S)$, наклон подобранной кривой отражает различные характеристики самоподобия. В то же время распределение энергетического спектра в исследуемой области является линейным, что отражает тот факт, что аномалии, распределенные в исследуемой области, самоподобны в частотной области и принадлежат к одному и тому же фрактальному распределению, с высокой вероятностью являющиеся продуктами одного и того же процесса, дополнительно демонстрируя, что аномалии и фоновые поля, извлеченные методом S-A, в большей степени соответствуют

фактическим геологическим условиям и могут более эффективно указывать на местоположение скрытых объектов.

4. Выводы

1. Геохимические данные представляют собой типичные данные о составе с эффектом замыкания. Прежде чем данные могут быть подвергнуты статистическому анализу, требуется ILR-преобразование данных. Этот метод может эффективно устранить эффекты замыкания в геохимических данных, одновременно выявляя истинную структуру пространственного распределения элементов.

2. Основные компоненты PC1 и PC2, связанные с минерализацией, были получены с помощью надежного анализа основных компонентов преобразованных в ILR данных исследуемой области. Основные компоненты PC1 и PC2 отражают комбинацию элементов, связанных с минерализацией Au.

3. Метод S-A учитывает пространственную геометрию и частотное распределение геохимических закономерностей. Это обеспечивает эффективное средство для характеристики полей геохимических аномалий и разложения разнообразных геохимических полей.

4. Метод S-A использовался для разложения составных аномалий комбинаций основных компонентов PC1 и PC2 в исследуемой области, и разложенные аномалии и справочная информация хорошо соответствовали известным месторождениям Au. В то же время на их периферии был получен ряд геохимических аномалий с потенциалом поиска, что обеспечило теоретическую основу и фокус для следующего этапа поиска руд в исследуемом районе.

III. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА МИНЕРАЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА (район Да Хинган, Китай) [3].

1. Введение

Изучение поверхностных геохимических аномалий играет важную роль при прогнозировании рудного потенциала перспективных территорий, в т. ч. малозаметных геохимических аномалий, выявление которых представляет определенную проблему.

В этом материале представлены результаты геохимического количественного прогнозирования полиметаллического (Pb–Zn) оруденения в рудном районе Да Хинган в Китае. Район исследований расположен в автономном районе Внутренняя Монголия в пределах позднепалеозойского аккреционного орогенного пояса (рис. 1).

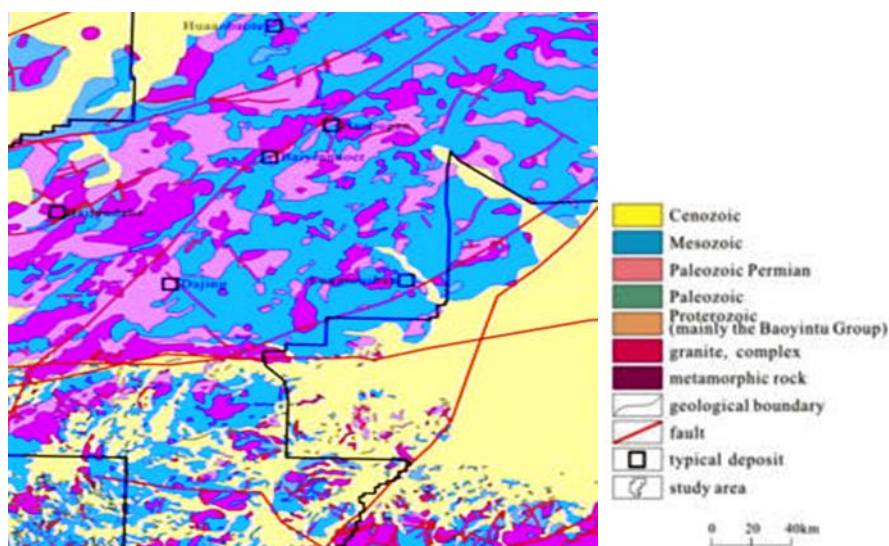


Рис. 1. Геологическая карта исследуемого района.

Породы, обнаженные в районе, относятся к палеопротерозойской группе Баоиньту и палеозойским и кайнозойским толщам. Группа Баоиньту представляет собой совокупность осадочных, метаморфических и вулканических пород. Наиболее развитыми структурами являются разломы северо-западного направления. Интрузивные породы представлены мезозойскими гранитоидами и grano-диоритами, вулканические – кислыми эффузивами и кайнозойскими базальтами. Метаморфизм характеризуется проявлением зеленосланцевой и амфиболитовой фаций в основном в породах пермского возраста. Территория расположена в полусасушливой средне- и низкогорной ландшафтной зоне.

Более 80% полиметаллических месторождений Ag-Cu-Pb-Zn-Sn обнаружены в пермских формациях. Мезозойская тектоно-магматическая активизация является основным фактором, определяющим формирование этих месторождений. Большая их часть расположена во внутренних и внешних зонах контактов вулканоплутонических массивов.

2. Материалы, обработка и методы анализа.

Для определения поверхностных, в т.ч. слабых геохимических аномалий, были использованы данные геологических и геохимических отчетов, отчеты о ГРР, а также данные исследования почв и речных отложений. Данные бурения и отчеты о запасах открытых рудных месторождений были использованы для проверки точности и достоверности результатов количественной оценки.

Образцы донных отложений были собраны с плотностью одна проба на км² на площади около 75 000 км². Равные по весу пробы на 4 км² были объединены в составную пробу для анализа 39 элементов и оксидов: Ag, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, F, Hg, La, Li, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Sb, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn, Zr, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, MgO и Fe₂O₃. В целом были использованы аналитические данные для 18 807 образцов донных отложений.

Аналитические процедуры соответствовали процедурам, указанным в руководстве RGNR. Сертифицированные эталонные материалы (CRM), разработанные IGGE, составляющие около 8% от общего количества образцов, были случайным образом добавлены в каждую партию из 50 образцов и проанализированы вместе с полевыми образцами. Затем были рассчитаны относительная погрешность (RE%) для отслеживания смещения между партиями и процентное относительное стандартное отклонение (RSD%) для оценки точности анализа следующим образом:

$$RE (\%) = (C_d - C_r) / C_r \times 100,$$

$$RSD (\%) = \frac{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (C_d - C_r)^2] / n}}{C_r}, \quad 1, 2$$

где C_d - определенная концентрация, а C_r - сертифицированная эталонная концентрация.

Анализы считались приемлемыми, если абсолютные значения RE составляли $\leq 50\%$ для образцов с концентрациями, в три раза превышающими предел обнаружения, и $\leq 35\%$ для образцов с концентрациями, более чем в три раза превышающими предел обнаружения. Если абсолютное значение REs выходило за указанные пределы, пробы партии подвергались повторному анализу.

Анализы считались приемлемыми, если RSD составляли $\leq 40\%$ для образцов с концентрациями, в три раза превышающими пределы обнаружения, и $\leq 25\%$ для образцов с концентрациями, более чем в три раза превышающими пределы обнаружения.

Повторяющиеся образцы (равные 5% от общего количества образцов) были выбраны случайным образом для оценки точности анализов. Процент относительного отклонения (RD%) был рассчитан следующим образом:

$$RD(\%) = [(C_1 - C_2) / ((C_1 + C_2) / 2)] \times 100, \quad (3)$$

где C_1 - первое определение, а C_2 - второе определение. Анализы считались приемлемыми, если абсолютный RDS составлял $\leq 40\%$. Все элементы во всех дубликатах демонстрировали надежную точность.

Анализ образцов почвы и горных пород из типичных рудных месторождений проводился в соответствии с вышеупомянутыми аналитическими процедурами.

Для исходных данных по каждому элементу проводился тест нормального распределения. Если исходные данные соответствовали нормальному или логарифмически нормальному распределению, вычислялись среднее значение и стандартное отклонение (S dev) исходных данных. Пороговое значение для каждого элемента было определено как среднее значение плюс два стандартных отклонения. Если исходные данные не соответствовали нормальному или логнормальному распределению, экстремальные выбросы, превышающие в три раза стандартные отклонения, удалялись из геохимических данных итеративно до тех пор, пока все остальные данные не попадали в диапазон трех стандартных отклонений и соответствовали приблизительному нормальному распределению. Был получен новый набор данных, состоящий из оставшихся данных. Средние значения в качестве фоновых значений элементов были рассчитаны с использованием оставшихся данных.

Пороговое значение каждого использованного элемента было определено как фоновое значение плюс два стандартных отклонения. Контурные карты элементов были подготовлены с использованием метода кригинга, доступного в Surfer 8.0 (Golden Software Inc., Голден, Колорадо, США).

2.1. Выделение слабых геохимических аномалий.

Контрастность элемента - это отношение концентрации его геохимической аномалии к его фоновому значению. Контрастные значения элементов могут использоваться для указания интенсивности и четкости геохимических аномалий, и они обычно используются для определения границ аномалий и выявления слабых аномалий. Контрастные значения элементов использовались для выявления и выделения слабых геохимических аномалий.

В качестве исходных были выбраны шесть типов месторождений: гидротермальные жилы Ag-Pb-Zn, скарновый тип Zn-Pb-Ag (-Sn), скарновый Pb-Zn-Cu-Sn, гидротермальный Sn-Cu, жильный Pb-Zn-Ag и гидротермальный Ag-Pb-Zn. Металлогеническая геологическая среда типичных месторождений, характеристики рудных тел и геохимические аномалии были детально изучены с целью создания их геолого-геохимических моделей в качестве эталонов для прогнозирования.

Чтобы уменьшить влияние некоторых сверхвысоких значений на процесс присвоения и стремиться к разумному присвоению, были приняты средние концентрации каждого элемента

во внутренней зоне геохимических аномалий типичных месторождений. На основе фоновых значений концентрации элементов в различных осадочных и магматических породах района было определено пороговое значение геохимической аномалии для каждого элемента, и за внешнюю, среднюю и внутреннюю зоны геохимических аномалий были приняты значения, в один, два и четыре раза превышающие пороговое значение. В качестве комбинаций элементов-индикаторов использовались средние концентрации элементов во внутренней зоне геохимических аномалий типичных месторождений.

Коэффициент сходства между каждой точкой данных и вышеупомянутой стандартной выборкой (комбинации основных индикаторных элементов типичного месторождения) был рассчитан следующим образом:

$$D_{(si)} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^p [\lg(X_{sk}) - \lg(X_{ik})]^2}{m}}, \quad (4)$$

где s - стандартная проба (каждое типичное месторождение), i - наблюдаемая проба, подлежащая оценке (каждая точка данных), m - количество элементов элементной ассоциации, X_{sk} - значение концентрации k -го элемента стандартной пробы, X_{ik} - значение концентрации k -го элемента наблюдаемой пробы и $D_{(si)}$ - числовое расстояние между наблюдаемым образцом и стандартным образцом.

Коэффициент подобия может быть получен путем преобразования приведенной выше формулы следующим образом:

$$R = 1 - D_{(si)}/\text{Max}(D), \quad (5)$$

где $\text{Max}(D)$ - максимальное значение $D_{(si)}$, а R - коэффициент подобия.

Наконец, коэффициенты сходства всех выборок наблюдений и стандартных образцов находятся в диапазоне от 0 до 1, при этом точки наблюдений, где были расположены типичные месторождения полезных ископаемых, имели степень сходства 1 с самими собой, в то время как все остальные были меньше 1. Более близкое значение R к 1 указывало на то, что наблюдаемая выборка была ближе к стандартной.

2.2. Прогнозирование минеральных ресурсов.

Для прогнозирования минерального потенциала территории был рассчитан коэффициент сходства данных между каждым местом отбора проб донных отложений и данными типичных месторождений.

Геохимическая количественная оценка минеральных ресурсов была основана на геолого-геохимических параметрах шести типичных месторождений. Районы, близкие по геологическим и геохимическим характеристикам к типичным месторождениям и с высокими коэффициентами сходства, были признаны благоприятными для минерализации и предпочтительно выбраны в качестве районов прогнозирования. Запасы типичных

месторождений были использованы для оценки количества ресурсов во вновь прогнозируемых благоприятных районах.

Одним из важных параметров при оценке и прогнозировании минерально-ресурсного потенциала является степень денудации, для оценки степени которой использовалось зонирование элементов. Индикаторами степени денудации служат правила распределения речных отложений для значений оценки зональности (т. е. соотношения между линейной продуктивностью элементов переднего и заднего ореолов) или мультипликативный (или аддитивный) индекс (т.е. соотношения между мультипликативными или аддитивными значениями контрастности элементов переднего и заднего ореолов или индикаторных элементов) в разных частях рудных тел. После нескольких таких тестов степень денудации определялась соотношением $(W \times S_n)/(A_s \times S_b)$.

Для прогнозирования минеральных ресурсов использовались два геохимических метода: метод аналогии (далее именуемый P_{r1}) и метод площадной продуктивности (далее именуемый P_{r2}).

Основная идея метода аналогии заключается в том, что ресурсы месторождения прямо пропорциональны аномальному размеру элементов в донных отложениях. Размер аномалии означает произведение площади аномалии на среднюю концентрацию Pb и Zn. Основная идея метода площадной продуктивности заключается в том, что ресурсы в регионе пропорциональны площадной продуктивности аномальной зоны. Ресурсы Pb и Zn (далее именуемые PR), размер аномалий (AD) и площадная продуктивность (AP) шести типичных месторождений перечислены в таблице 1.

Табл. 1.

Ресурсы Pb и Zn, размер аномалий,
площадная продуктивность шести типичных месторождений.

Typical Deposit	Resources ($\times 10^4$ Tons)	AD	AP
Bairendaba	132.56	9516.51	8507.1
Huaobaote	42.82	6439.69	5747.28
Haobugao	63.26	4143.2	3306.71
Baiyinnuoer	123.06	2831.09	2281.82
Dajing	50	2378.83	1934.45
Longtoushan	53.12	4713.7	4451.98

Формула расчета аналогичного метода выглядит следующим образом:

$$SC \times \frac{AP}{\frac{P}{1-w}} = \frac{AP_r}{\frac{P_{r1}}{1-w_r}}. \quad (6)$$

После преобразования она становится следующей:

$$P_{r1} = \frac{AP_r}{AP} \times \frac{1 - w_r}{1 - w} \times \frac{1}{SC} \times P, \quad (7)$$

где AP - произведение площади и средней концентрации элементов в типичном месторождении, P - ресурс типичного месторождения, AP_r - произведение площади и средних концентраций элементов в области металлогенического прогнозирования, P_{r1} - ресурс области металлогенического прогнозирования, w - коэффициент денудации типичного месторождения, w_r - коэффициент денудации области металлогенического прогнозирования, и SC - коэффициент схождения между областью металлогенического прогнозирования и типичным месторождением.

Формула метода площадной продуктивности рассчитывается следующим образом:

$$SC \times \frac{S(X - B)}{\frac{P}{1 - w}} = \frac{S_r(X_r - B_r)}{\frac{P_r}{1 - w_r}}. \quad (8)$$

После преобразования она становится следующей:

$$P_{r2} = \frac{S_r(X_r - B_r)}{S(X - B)} \times \frac{1 - w_r}{1 - w} \times \frac{1}{SC} \times P, \quad (9)$$

где S - площадь типичного месторождения, P - ресурс типичного месторождения, X - средние концентрации элементов в районе типичного месторождения, B - элементный фон в районе типичного месторождения, S_r - площадь области металлогенического прогноза, P_r - ресурс области металлогенического прогноза, X_r - средние концентрации элементов в районе типичного месторождения, область металлогенического прогноза, B_r - элементный фон в области металлогенического прогноза, w - коэффициент денудации типичного месторождения, w_r - коэффициент денудации области металлогенического прогноза и SC - коэффициент схождения между областью металлогенического прогноза и типичным месторождением.

3. Результаты

Геохимические карты были составлены с использованием контрастных значений элементов-индикаторов рудных месторождений Pb-Zn. Была принята совокупная частотная классификация с частотой как 25%, 50%, 80%, 90%, 95%, и 98%. По сравнению с геохимической картой Pb средние значения контрастности Pb-Zn-Ag-Cd могли бы более четко выделить известные месторождения, особенно месторождения металлов Pb-Zn-Ag. Кроме того, она выявила множество слабых геохимических аномалий. Это может дать новые подсказки для поисков в районах со слабыми геохимическими аномалиями (рис. 2).

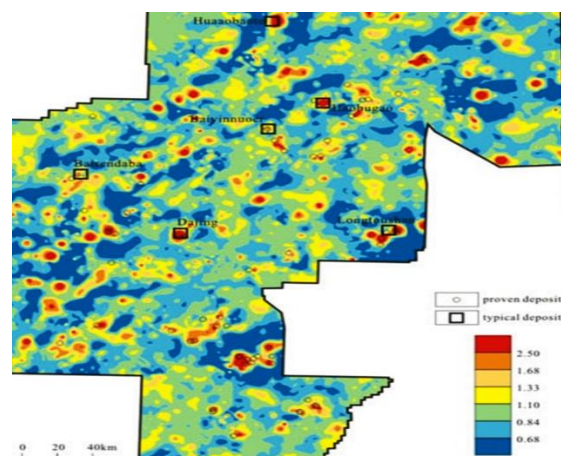


Рис. 2. Геохимическая карта средних значений контраста Pb-Zn-Ag-Cd.

Средние концентрации элементов во внутренней зоне геохимической аномалии типичных месторождений, использованных в качестве комбинаций элементов-индикаторов в этом исследовании, перечислены в таблице 2.

Табл. 2.

Средние концентрации основных элементов-индикаторов
во внутренних зонах геохимических аномалий типичных месторождений.

Name of Deposit	Indicator Element Combination (the Mean Value of the Inner Zones of Geochemical Anomalies). The Concentration of Elements Is 10^{-6} g/g; That of Ag and Cd Is 10^{-9} g/g.
Bairendaba	Ag(784.00) + Bi(8.58) + Cd(283.80) + Mo(7.07) + Sb(50.19) + Zn(249.38)
Huaobaote	Ag(2263.13) + As(313.36) + Cd(971.10) + Mo(6.22) + Sb(26.17) + W(33.42) + Zn(500.96)
Haobugao	Ag(1416.80) + As(486.82) + Bi(2.88) + Cd(9507.90) + Cu(66.07) + Pb(245.44) + Sb(8.28) + Sn(41.98) + W(9.24) + Zn(1191.31)
Baiyinnuoer	As(265.70) + Bi(3.17) + Cd(330.50) + Pb(44.42) + Sn(25.10)
Dajing	Ag(1506.50) + As(210.94) + Cd(1014.00) + Pb(644.03) + Sb(4.45) + Zn(83.97)
Longtoushan	Ag(4005.00) + As(609.35) + Bi(43.86) + Cd(713.77) + Mo(300.90) + Pb(560.47) + Sb(17.92) + Zn(2517.98)

Метод составления карты с коэффициентом сходства был аналогичен методу составления геохимической карты с контрастным значением. Совокупная частота была принята для классификации на карте коэффициента сходства и разделена на семь уровней следующим образом: 50%, 80%, 90%, 95%, 97%, и 99%. Если совокупная частота коэффициента подобия достигает 99%, это указывает на то, что 1% наблюдаемых образцов аналогичны стандартным образцам и имеют поисковый потенциал. Если совокупная частота коэффициента подобия достигает 97%, это указывает на то, что 3% наблюдаемых образцов аналогичны стандартным образцам и имеют определенную степень минерализации (рис. 3).

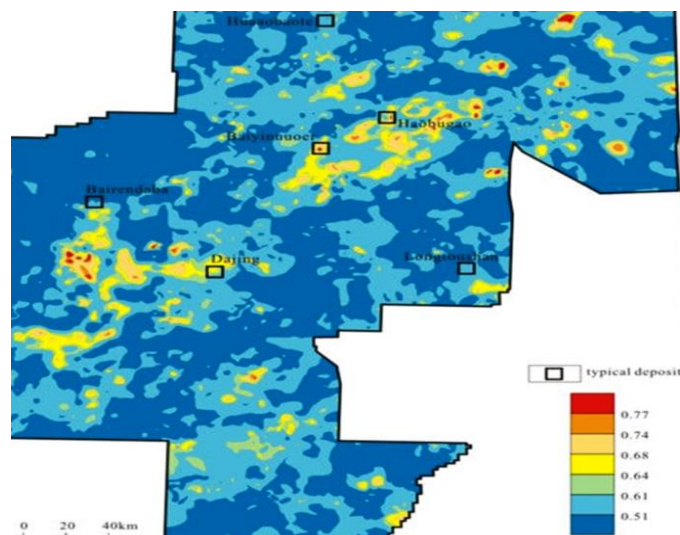


Рис. 3. Карта коэффициентов сходства с типичным месторождением Pb-Zn.

Рисунок 3 представляет собой карту коэффициентов подобия месторождения Pb-Zn в качестве стандартного образца. Это показывает, что наблюдательные образцы, аналогичные месторождению Pb-Zn, были в основном сосредоточены в южной части района. В нем также четко очерчены границы района, уточнено содержание карты и обозначены некоторые новые геохимические аномалии, на которые даны ссылки для дальнейших исследований.

3.1. Определение металлогенической прогнозной зоны.

На основе комплексного анализа геохимических, геологических, минералогических, геофизических, ДДЗ и др. данных, а также геохимических карт контрастности, степени денудации и коэффициента подобия металлогенические прогнозные площади были оптимизированы следующим образом:

Параметр 1: Сходство ассоциации элементов между образцом наблюдения и типичным месторождением велико, а совокупная частотная градация равна или превышает 97%.

Параметр 2: Металлогенические геологические условия благоприятны. Основными рудовмещающими формациями на исследуемой территории являются пермские и юрские осадочно-метаморфические толщи и магматические породы.

Параметр 3: Близость рудных объектов.

Параметр 4: Значение контрастности Рb или Zn равно или превышает 1,3 (совокупная частотная градация $\geq 90\%$).

Параметр 5: Среднее значение контраста Pb-Zn-Ag-Cd равно или превышает 1,3 (совокупная частотная градация $\geq 90\%$).

Параметр 6: В составе Pb, Zn, Ag и Cd присутствуют по крайней мере три элемента, контрастность которых не ниже 1,1 (суммарная частотная градация $\geq 80\%$).

Если прогнозная зона соответствовала всем перечисленным выше параметрам, она классифицировалась как прогнозная зона уровня А. Если прогнозируемая территория соответствовала параметрам, перечисленным выше, за исключением параметра 3, она классифицировалась как прогнозируемая территория уровня В.

В соответствии с этими критериями на территории было выделено 36 прогнозных зон, в том числе три прогнозных зоны уровня А и 33 прогнозных зоны уровня В (рис. 4).

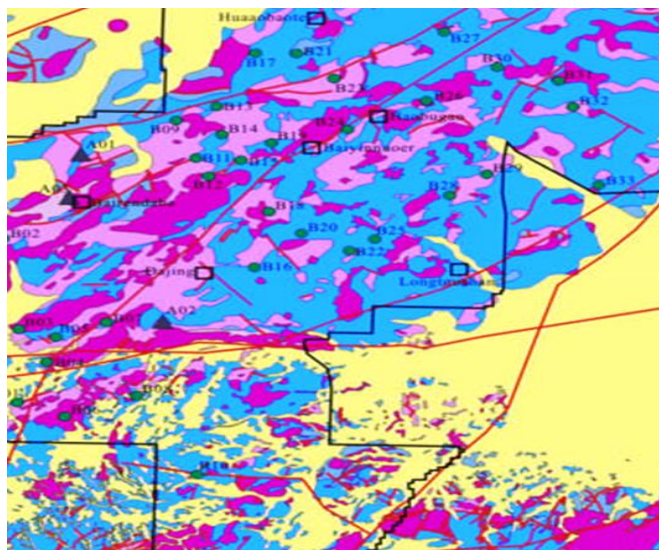


Рис. 4. Схема металлогенических прогнозных зон.

Участки, соответствующие известным месторождениям, не были включены в 36 прогнозируемых. Если прогнозные участки были похожи более чем на одно типичное месторождение в шести стандартных образцах одновременно, типичное месторождение с более близким пространственным расстоянием и более близкими геологическими условиями выбиралось как наилучшее аналогичное типичное месторождение для последующей оценки ресурсов.

Соотношение $(W \times Sn)/(As \times Sb)$ показало, что месторождения Pb–Zn показали низкую степень денудации. М-ния Sn–Pb–Zn–Ag показали среднюю степень денудации (рис. 5).

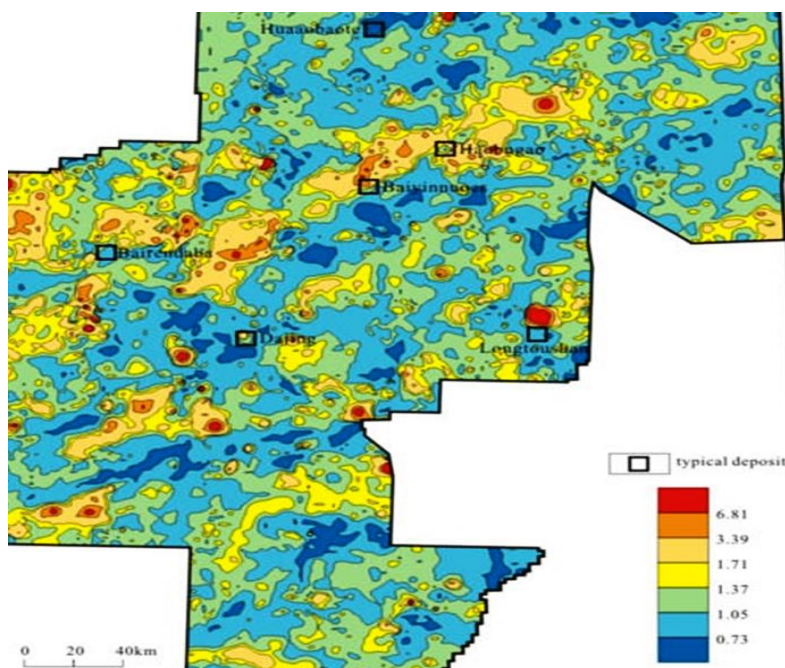


Рис. 5. Карта соотношения $(W \times Sn)/(As \times Sb)$.

3.2. Результаты прогнозирования минеральных ресурсов.

Сравнение показало, что результаты расчета ресурсов двумя методами были относительно близки друг к другу. Было принято среднее арифметическое взвешенных прогнозируемых ресурсов (PRS) из двух методов.

Окончательные прогнозные ресурсы (PRs) были рассчитаны следующим образом:

$$PR=0,6P_{r1} + 0,4P_{r2} \quad (10)$$

Результат показывает, что ресурсы трех прогнозных участков уровня А и 33 прогнозных участков уровня В составили 52 500 т и 3,2 млн т соответственно (табл. 3).

Было проверено пять прогнозных участков. На прогнозных участках В02 и В24 были выявлены рудопроявления Pb–Zn–Ag. На трех прогнозных участках В23, В29 и В33 были подсчитаны запасы

Доказанные (Р) и прогнозируемые ресурсы трех участков сравниваются в таблице 4.

Табл. 3.

Прогнозируемые ресурсы района ($\times 10^4$ т).

Number	P _{г1}	P _{г2}	PR
A01	0.94	0.58	0.8
A02	4.01	2.76	3.51
A03	1.05	0.78	0.94
B01	9.36	7.71	8.7
B02	9.54	7.13	8.58
B03	5.83	4.13	5.15
B04	20.69	16.23	18.9
B05	25.51	25.92	25.67
B06	28.11	19.85	24.8
B07	9.67	6.6	8.44
B08	3.61	2.47	3.15
B09	21.17	17.47	19.69
B10	2.2	1.61	1.96
B11	9.06	6.24	7.93
B12	17.98	17.26	17.69
B13	24.83	22.84	24.03
B14	5.6	3.78	4.88
B15	11.38	7.85	9.97
B16	5.26	3.59	4.59
B17	3.8	3.27	3.59
B18	5.68	3.53	4.82
B19	3.89	2.66	3.4
B20	9.83	8.52	9.31
B21	3.56	2.26	3.04
B22	1.52	0.93	1.28
B23	22.26	19.2	21.04
B24	15.89	10.95	13.91
B25	1.73	1.16	1.5
B26	12.9	9.75	11.64
B27	1.47	0.92	1.25
B28	1.83	1.73	1.79
B29	10.83	1.94	7.27
B30	10.24	8.26	9.45
B31	5.19	3.77	4.62
B32	7.19	6.23	6.81
B33	3.99	3.09	3.63

Табл. 4.

Прогнозируемые и доказанные ресурсы ($\times 10^4$ т).

Number	P _{г1}	P _{г2}	PR	P
B23	22.26	19.2	21.04	10.17
B29	10.83	1.94	7.27	6.57
B33	3.99	3.09	3.63	1.52

Результаты показывают, что прогнозируемые ресурсы превышают доказанные. Доля доказанных ресурсов в прогнозируемых трех различных участках различна, что может быть связано со степенью их разведанности, указывая на достоверность прогнозируемых ресурсов.

4. Выводы.

1. Поверхностные геохимические аномалии, включая слабые, выявленные при опробовании речных отложений, содержат ценную поисково-разведочную информацию. Слабая поверхностная геохимическая информация о Pb, Zn может быть подчеркнута средними значениями контраста Pb–Zn–Ag–Cd.

2. Коэффициенты сходства с типичными разведанными месторождениями могут быть использованы для выявления новых аномалий минерализации и определения целевых зон для поисков.

3. Степень денудации рудных месторождений можно определять по соотношению $(W \times Sn) / (As \times Sb)$ для данных о речных отложениях.

4. Были определены тридцать шесть прогнозных участков с ресурсами Pb–Zn в 307,73 млн т, и в результате проверки были обнаружены несколько новых рудопроявлений.

5. Пример количественной прогнозной оценки потенциала минеральных ресурсов с помощью геохимических методов может быть использован в качестве прогнозно-поискового метода.

IV. ВЫЯВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ (*регион Мила, Тибет*) [2].

Введение.

Растеризация региональных геохимических данных является обычным процессом при обработке геохимических данных; метод кригинга и метод обратного взвешивания расстояний (IDW) являются распространенными методами растеризации. Ключевая проблема заключается в том, что простой математической функции или детерминированной модели сложно точно описать пространственную изменчивость элемента, чтобы вывести значение в местоположении без выборки из ограниченных или разреженных данных геохимических поисков, что приводит к неопределенности в пространственном прогнозировании. Увеличение плотности выборки, безусловно, может повысить точность прогнозирования, но за этим следует более высокая стоимость. Поэтому при геохимических поисках следует уделять больше внимания неопределенности, которая влияет на результаты. Метод геостатистического моделирования может преодолеть эффект сглаживания, вызванный интерполяцией, посредством моделирования пространственной неопределенности местоположения без выборки. Метод геостатистического моделирования может генерировать равновероятные реализации значений целевых атрибутов и присваивать значения исходному положению отбора проб. Результат моделирования может более реалистично отражать пространственное изменение целевого атрибута.

Традиционный метод геостатистического моделирования основан на вариограмме и учитывает корреляцию только между двумя точками в пространстве. Что касается сложных геологических условий или моделей пространственного распределения элементов, следует описывать более двух статистических точек. Многоточечное геостатистическое моделирование - это метод целевого моделирования, который фокусируется на многоточечных структурах в пространстве и использует преимущества традиционной двухточечной геостатистики для лучшей характеристики пространственной изменчивости и определения неопределенности переменных. Соответствующие алгоритмы моделирования включают моделирование на основе пикселей, такое как алгоритм моделирования расширенных нормальных уравнений (ENESIM), алгоритм моделирования единственного нормального уравнения (SNESIM) и алгоритм прямой выборки (DS); моделирование на основе шаблонов, такое как алгоритм моделирования шаблонов (SIMPAT); моделирование на основе фильтров (filter based pattern simulation). FILTERSIM алгоритм и алгоритм моделирования на основе взаимной корреляции (CCSIM) алгоритм. Эти методы были эффективно применены в моделировании коллекторов,

гидрогеологическом моделировании, реконструкции пористых сред и других областях геонаук, но существует несколько приложений, связанных с геохимическими поисками. Основная причина этого заключается в том, что соответствующее обучающее изображение (ТИ) трудно получить из-за сложного пространственного распределения геохимических элементов. Хотя сами данные могут быть использованы в качестве обучающего изображения, иногда также сложно получить соответствующие шаблоны сопоставления.

В этом исследовании предлагается гибридный метод, сочетающий алгоритм прямого отбора проб (DS) многоточечного геостатистического моделирования и анализ локальных особенностей (LSA) для оценки аномалий Cu, на основе геохимических данных речных отложений в регионе горы Мила в Тибете, Китай.

2. Методология

2.1. Алгоритм прямой выборки (DS)

Вместо использования вариограммы для описания пространственно неоднородных геометрических объектов многоточечная геостатистика нацелена на использование достоверных данных (данные о буровых скважинах и т.п.) в качестве условных данных для извлечения пространственных закономерностей из обучающих изображений (ТИ). Таким образом, результаты моделирования эффективно отражают условные данные и могут лучше воспроизводить структуру моделируемого объекта.

Алгоритм прямой выборки представляет собой многоточечный геостатистический алгоритм на основе пикселей, который используется для моделирования случайной функции $Z(x)$.

Обычно условные данные присваиваются ближайшему узлу сетки в сингулярной сетке (SG), и моделирование выполняется путем доступа к остальным узлам в SG по определенному случайному пути до тех пор, пока не будут пройдены все сетки.

Подробнее, это включает в себя выбор n ближайших узлов сетки $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ к последовательному расположению x , вычисление векторов запаздывания $L = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ и определение события передачи данных $dn(x, L) = \{Z(x+h_1), Z(x+h_2), \dots, Z(x+h_n)\}$. Тем временем ТИ сканируется случайным образом для получения данных о событии, $dn(y, L) = \{Z(y+h_1), Z(y+h_2), \dots, Z(y+h_n)\}$ для каждого местоположения y . Когда расстояние между $dn(x, L)$ меньше заданного порога t , $Z(y)$ принимается за наиболее подходящее значение, присвоенное $Z(x)$. В противном случае максимальная доля сканирования f настроен для управления реализацией моделирования путем принятия $Z(y)$, который имеет наименьшее

расстояние между $dn(x, L)$ в качестве согласованного значения $Z(x)$. Это повторяется до тех пор, пока не будут смоделированы все узлы в SG.

Для непрерывных переменных евклидово взвешенное расстояние между многоточечными образцами может использоваться для представления расстояния до образца (уравнения (1)–(3)), т.е.,

$$d\{d_n(x, L), d_n(y, L)\} = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i \left[\frac{Z(x_i) - Z(y_i)}{d_{\max}} \right]^2} \in [0, 1] \quad (1)$$

где

$$d_{\max} = \max_{y \in TI} Z(y) - \min_{y \in TI} Z(y) \quad (2)$$

$$w_i = \frac{h_i^{-2}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-2}} \quad (3)$$

В оригинальном методе DS, если невозможно найти совпадающий паттерн при максимальной сканирующей доле f достигнуто, узел y принимается наименьшее расстояние и его значение $Z(y)$ присвоен $Z(x)$. Таблица 1 показывает работу алгоритма прямого отбора проб.

Табл. 1.

Алгоритм прямого отбора проб.

Inputs:
m variables $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ to simulate Simulation grid, SG Training image, TI Set of conditioning data points Maximum number of neighbors n , distance threshold t , maximum fraction of TI scanned f
Algorithm steps
1 Migrate conditioning points to the corresponding grid nodes. 2 Define a simulation path. 3 Until all SG nodes have been visited, 4 Define the node x to be simulated. 5 Find Nx , made of the n closest neighbors of x . 6 Define the random path L of scanning TI. 7 For each node y on L , 8 Compute the distance $d(Nx, Ny)$. 9 If $d(Nx, Ny) < t$ 10 $Z(x) = Z(y)$ 11 break 12 end if 13 if scanned $> f$ 14 $Z(x) = Z(y^*)$, where y satisfies $d(Nx, Ny^*)$ is the smallest 15 break 16 end if 17 end for 18 end for Output: Simulation grid, SG.

Поскольку пространственное распределение геохимических элементов имеет сложные вариации характеристик, на начальной стадии случайного моделирования распределение условных данных является разреженным, что увеличивает область распространения событий данных. В результате может оказаться невозможным найти шаблон, соответствующий текущим моделируемым событиям данных о местоположении во всем обучающем изображении. Если принято наименьшее расстояние и его значение присвоено центральному узлу, несоответствие будет увеличиваться по мере продолжения моделирования. Таким образом, в этом

исследовании была предпринята попытка добавить значение индекса текущего местоположения моделирования в конец траектории моделирования и заморозить его при обнаружении этой непревзойденной закономерности. Как показано на рисунке 1, после моделирования всех узлов точки моделирования, которые не могут соответствовать модели в первом раунде моделирования, размораживаются, и затем эти узлы моделируются по порядку. Если узел по-прежнему не может найти соответствующий шаблон, принимается узел с наименьшим расстоянием, и его значение присваивается центральному узлу.

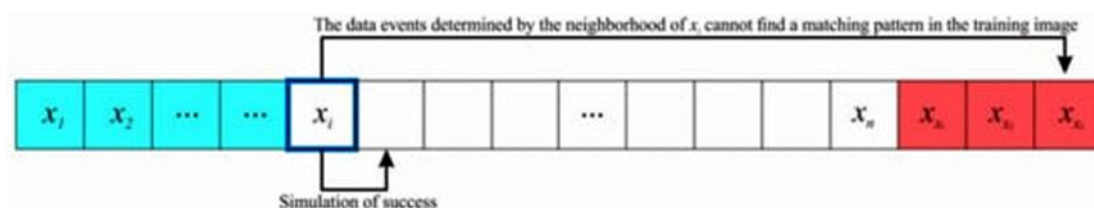


Рис.1. Траектория моделирования динамической организации.

2.2. Анализ локальных особенностей (LSA)

LSA - это характеристика аномального выделения энергии или накопления материала в узком пространственно-временном интервале, а металлогенический процесс также является разновидностью сингулярного геологического процесса. С точки зрения множества фракталов, анализ локальных особенностей может количественно охарактеризовать локальное обогащение и истощение геохимических элементов.

LSA может характеризоваться степенной зависимостью между содержанием элемента $\rho(\varepsilon)$ в небольшом районе и масштаб его измерения ε . Формула выглядит следующим образом (уравнения 4 и 5):

$$\rho(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\alpha-2} \quad (4)$$

или

$$\rho(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-\Delta\alpha} \quad (5)$$

с

$$\Delta\alpha = 2 - \alpha \quad (6)$$

где $\propto$ представляет собой пропорциональность, и α индекс сингулярности.

В геохимических исследованиях индекс сингулярности α может использоваться для измерения локальных изменений обогащения или истощения и для определения структуры пространственного распределения элементов: $\alpha \approx 2 (\Delta\alpha \approx 0)$ представляет собой не особое местоположение; $\alpha < 2 (\Delta\alpha > 0)$ указывает на обогащение содержания элементов; и $\alpha > 2 (\Delta\alpha < 0)$ обозначает истощение содержания элемента (уравнение (6)).

Как правило, после получения результатов анализа локальных особенностей необходимо определить соответствующий порог разделения, α_0 , для любого местоположения x ; $\alpha(x) \leq \alpha_0$

представляет собой уникальное местоположение, и $\alpha(x) > \alpha_0$ представляет собой фоновое значение. Метод сингулярного квантиль-квантиля (S-Q), основанный на анализе особенностей и анализе графиков квантиль-квантиль, использовался для разделения множества геохимических популяций в частотной области. Основная цель - определить нормальную опорную линию и остаточную кривую подгонки путем установки доверительного интервала сингулярного индекса (например, 99%) и выбора соответствующего процентильного интервала (например, 15-го и 85-го). Затем используется общий сингулярный индекс для соответствия полиномиальной кривой, и две точки пересечения или пороговые значения могут быть рассчитаны по трем кривым; они расположены выше или ниже нормальной контрольной линии соответственно. В результате гибридная схема геохимического распределения сингулярного индекса может быть разделена на три популяции в частотной области, соответствующие обогащению элементами, несингулярности и истощению, соответственно. Наконец, сингулярные индексы частотного распределения преобразуются в пространственную область для геохимического картирования.

2.3. Объединение вероятностей аномалий на основе анализа неопределенности.

Неопределенность целевого атрибута в конкретном местоположении может быть представлена рядом вероятностных значений. Локальная неопределенность положения x может быть выражена как вероятность того, что значение $\alpha(x)$ на месте x меньше или больше заданного порога.

В этом исследовании в качестве объекта исследования был взят анализ локальных особенностей геохимических аномалий Cu и оценена их неопределенность. Предполагается, что нижний порог разделения равен α_0 вероятность аномалии текущего местоположения может быть определена как доля сингулярного индекса, которая не превышает порогового значения (уравнения (7) и (8)), т.е.,

$$\text{Prob}_{DS}[\alpha(x_i) \leq \alpha_0] = \frac{\sum_{j=1}^L I[\alpha(x_i) \leq \alpha_0]}{L} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$I[\alpha(x_i) \leq \alpha_0] = \begin{cases} 1, & \text{if } \alpha(x_i) \leq \alpha_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

Целое число L представляет собой общее количество реализаций алгоритма DS, а N - количество узлов сетки во всей исследуемой области.

Достоверность геохимической аномалии может быть описана пространственной неопределенностью, которая может определяться совместной вероятностью L реализаций (Уравнение 9):

$$Prob_{DS}[\alpha(x_1) < \alpha_0, \alpha(x_2) < \alpha_0, \dots, \alpha(x_N) < \alpha_0] = \frac{n(x_1, x_2, \dots, x_N)}{L} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

где α_0 порог разделения сингулярного индекса, обычно меньше 2; целое число L общее количество реализаций алгоритма DS; $n\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ это количество $\alpha(x_i) < \alpha_0$ на месте x_i в L реализации.

После этого может быть сгенерирована «карта вероятности аномалий» для выявления более обоснованных геохимических аномалий.

3. Территория исследования и геохимические данные.

Район исследования расположен в восточно-Гангдзском металлогеническом поясе (самым известным регионом медного оруденения в Тибете0 (рис. 2).

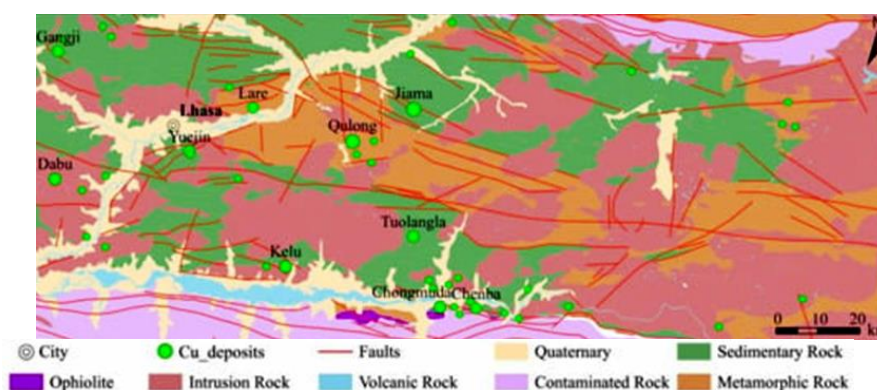


Рис. 2. Геологическая схема исследуемого района.

Минерализация связана с постколлизийными интрузиями небольшого объема, которые внедрились как в до-, так и в син-коллизийные гранитные батолиты и более ранние стратиграфические вулканогенно-осадочные толщи. Осадочные породы включают песчаники, сланцы, аргиллиты и известняки от палеозоя до кайнозоя. Интенсивная магматическая деятельность проявлялась в мезозое и кайнозое. Интрузии, в основном средней кислотности, определяется разломами. Основные - имеют E-W, N-E и N-S ориентацию. Системы разломов контролируют распределение рудных месторождений в районе. E-W-ориентированные разломы контролируют распределение залежей меди, а разломы с N-E и N-S ориентацией - залежей Cu, Mo, Au, Pb, Zn и других металлов.

Набор геохимических данных в этом исследовании является результатом отбора проб донных отложений и многоэлементным анализом 39 элементов (включая Bi, Cu, P, La, Li, Ag, Sn, Au, Mo, Th, U, W, Sb, Hg, Mn, Cr, Sr, Nb, Pb, Ni, Ti, Y, Cd, Co, Ba, Be, V, Zn, B, As, Zr, F, Fe₂O₃, K₂O, CaO, MgO, Na₂O, Al₂O₃ и SiO₂). Плотность опробования составляет 1 образец на 4 км², и в общей сложности в этом районе исследований было отобрано 4 141 образец (рис. 3).

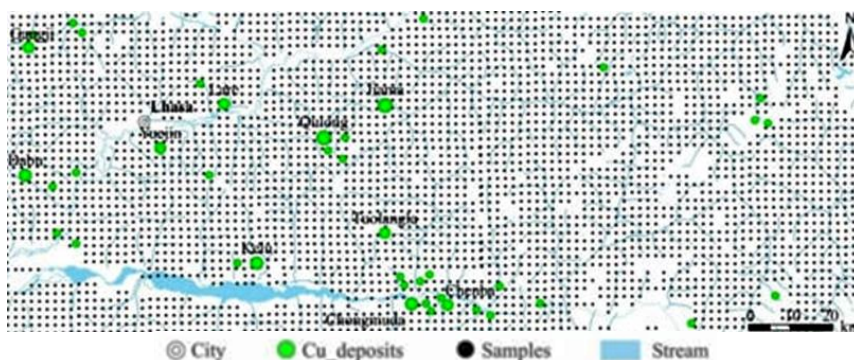


Рис. 3. Расположение геохимических образцов.

39 элементов были проанализированы различными методами (в основном включая ICP-MS, XRF и ICP-AES). Конкретные методы испытаний, пределы обнаружения, контроль качества и другую информацию, соответствующую каждому элементу, можно найти в соответствующей литературе.

4. Результаты.

4.1. Моделирование алгоритма прямого отбора проб меди.

Месторождения меди являются наиболее важным потенциальным минеральным ресурсом в этой исследуемой области, было обнаружено несколько значительных месторождений меди, включая Кулонг и Цзяма. Данные по элементам Cu были выбраны для проверки возможности многоточечного геостатистического моделирования путем оценки неопределенности аномалий Cu и определения целей ГРП.

Для моделирования распределения Cu использовался алгоритм прямой выборки. Сначала исходные данные выборки Cu были преобразованы в растровые данные. Территория исследования была разделена на сетки 108×41 с размером сетки 2×2 км в соответствии с фактическим интервалом отбора проб, чтобы минимизировать потерю информации (рис. 4).

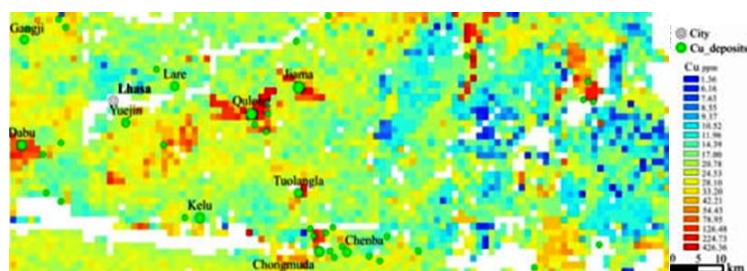


Рис. 4. Растровая карта Cu: территория разделена на сетки 108×41 с размером 2×2 км.

Эти растровые данные можно рассматривать не только как сетку, которую необходимо смоделировать, но также как “обучающее изображение”, на основе которого выводятся многоточечные шаблоны, необходимые для моделирования. Было выполнено DS-

моделирование растровых данных с использованием параметров, установленных в таблице 2, и результат показан на рисунке 5.

Табл. 2.

Параметры DS для тематического исследования.

Parameter	Notation	Value
Number of realizations	L	200
Number of points in the data event	n	20
Max fraction of input data to scan	f	0.8
Distance threshold	t	0.02
Search radii	r	15
Path type		Fully random path

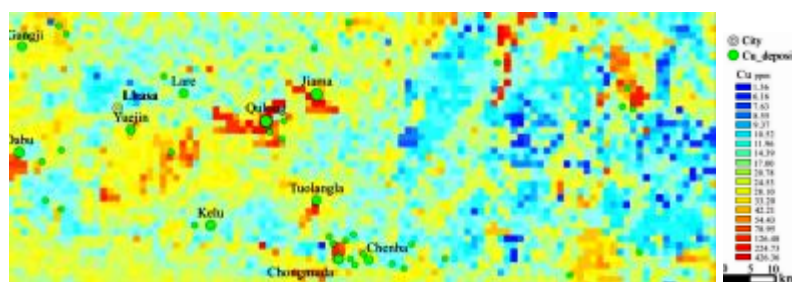


Рис. 5. Реализация Cu: территория разделена на сетки 108×41 с размером 2×2 км.

Впоследствии, для получения более подробной информации, исследуемая территория была разделена на сетки размером 216×82 с размером 1×1 км, а затем исходные данные были преобразованы в растровые данные с использованием этого размера сетки (рис. 6), с рисунком 5 в качестве обучающего изображения и растровыми данными в качестве условных данных. Алгоритм прямой выборки был использован еще раз для моделирования значения в сетке нулевых значений, сгенерировав 200 реализаций с равной вероятностью.

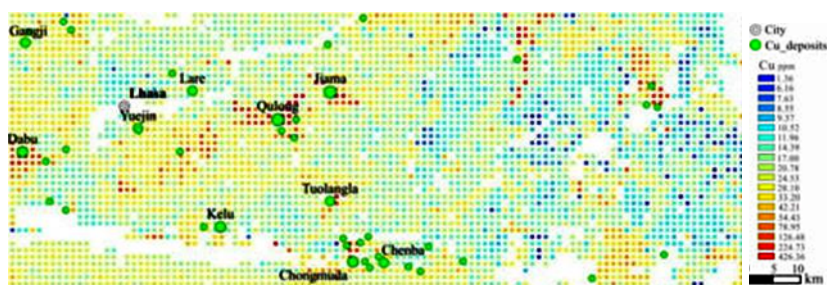


Рис. 6. Растровая карта Cu: территория разделена на сетки 216×82 с размером 1×1 км.

Четыре из 200 реализаций, сгенерированных с помощью моделирования алгоритма прямой выборки, были выбраны произвольно (рис. 7). Было обнаружено, что эффект сглаживания не проявился. Поскольку исходные данные и их статистические характеристики были учтены, смоделированные реализации отразили концентрацию элемента и даже закономерности его пространственного распределения. Небольшие расхождения между этими реализациями называются эргодическими флуктуациями, и их следует ожидать, поскольку пути каждой реализации различны, а значения местоположения без выборки связаны со всеми

значениями поблизости; любое положение в окрестности, где значение неопределенно, может распространять свою неопределенность, что приводит к неопределенности реализации.

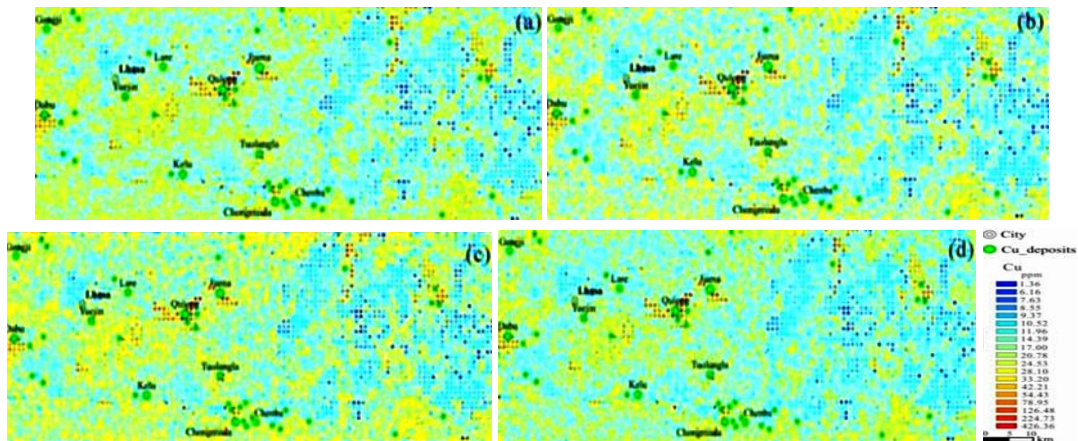


Рис. 7. Случайная выборка - 4 (a-d) из 200 реализаций, сгенерированных прямым моделированием.

4.2. LSA на основе стохастического моделирования

Анализ локальных особенностей использовался для обработки реализаций алгоритма DS. Квадратные окна сканирования размером 3×3 км², 5×5 км², 7×7 км²..., 15×15 км² были приняты для этого LSA (рис. 8).

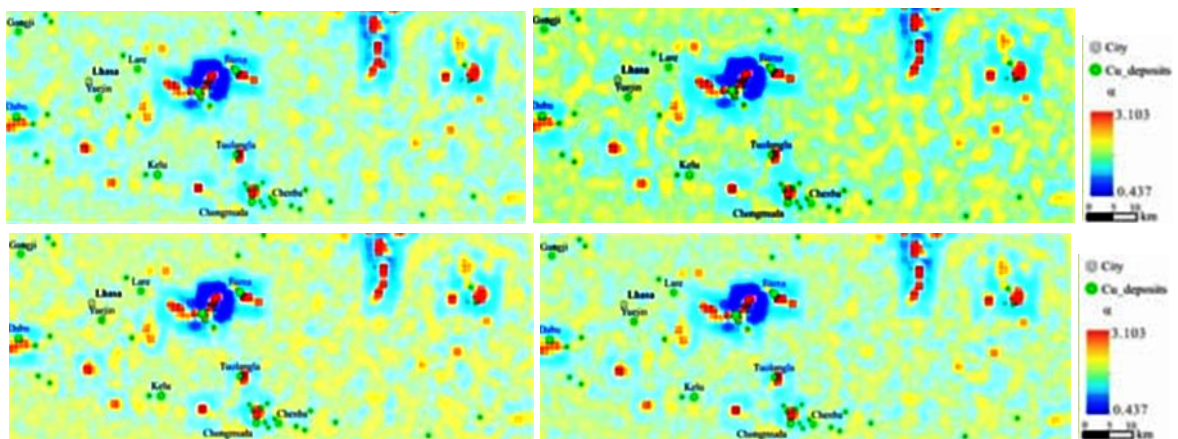


Рис. 8. Результаты анализа LSA для четырех реализаций (a-d).

Все результаты соответствующего LSA, связанные с реализациями, могут представлять неопределенность локальной особенности, которая распространяется из избранных местоположений.

Метод Е-типа α измеряет среднее значение или тенденцию особенности (рис. 9a). Можно видеть, что карта Е-типа α может лучше отображать непрерывность моделей пространственного распределения. Дисперсия α Е-типа может выражать разнообразие неопределенности, где максимальная прогнозируемая дисперсия означает максимальную неопределенность, и наоборот (рис. 9b). Местоположения вблизи границы имеют более

высокую неопределенность, которая может быть вызвана ограниченными значениями, используемыми при оценке LSA.

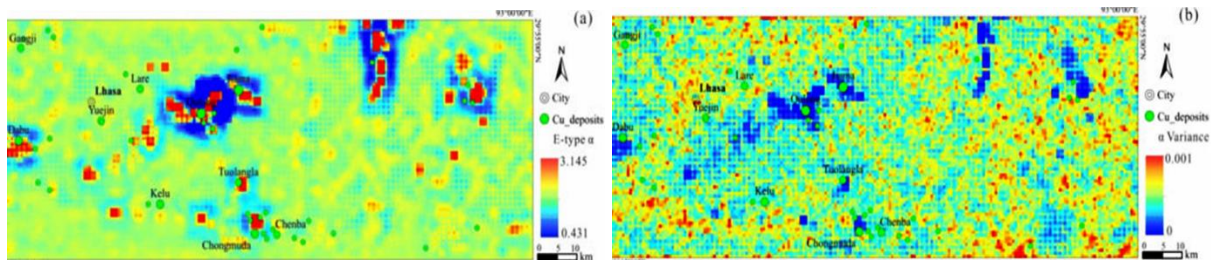


Рис. 9. (a) карта α E-типа и (b) карта α -дисперсии.

При сравнении результатов LSA на основе моделирования (рис. 9а), интерполяции по Кригингу (рис. 10а) и LSA на основе интерполяции по Кригингу (рис. 10б) в макроскопии показано аналогичное распределение Cu, но эффект сглаживания очевиден на рисунке 10. Для сравнения, поскольку исходные данные были учтены и была представлена средняя особенность, LSA на основе моделирования обладает более мощной способностью отражать закономерности геохимического распределения.

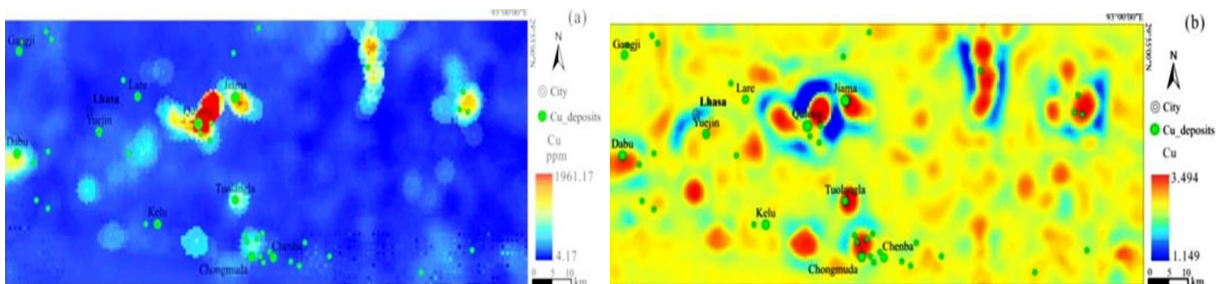


Рис. 10. (a) распределение Cu по обычному кригингу и (b) LSA на основе интерполяции по кригингу.

Определение зон аномалий является одним из наиболее важных этапов геохимического картирования. Разумные пороговые значения определенных элементов являются ключевым требованием (рис. 11).

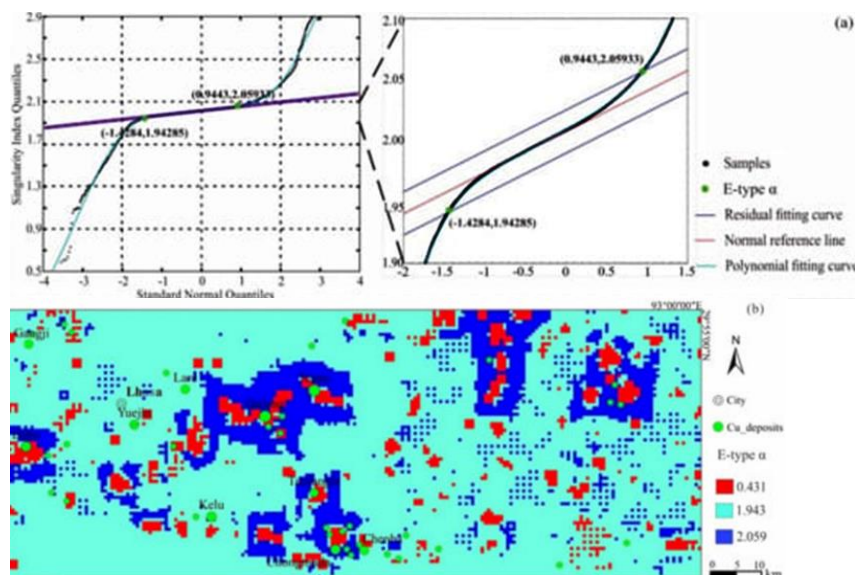


Рис. 11. Карта E-типа α с помощью метода S-Q в (a) частотной области и (b) пространственной области.

Метод анализа сингулярности-квантиль (S-Q) использовался для определения пороговых значений геохимических аномалий: (1) был выбран 99% доверительный интервал индекса сингулярности Cu E-типа; (2) нормальная контрольная линия и кривая остаточного соответствия были определены через 15-й и 85-й процентиля.

Значения индекса сингулярности E-типа 1,943 и 2,059 были определены в качестве пороговых значений, которые разделили модели пространственного распределения на три части (рис. 11а). Эти два значения могут представлять обогащение ($\alpha < 1,943$) и истощение ($\alpha > 2,059$) соответственно (рис. 11b).

4.3. Оценка неопределенности геохимической аномалии.

Неопределенность целевого атрибута может быть выражена в виде карты вероятностей, определяемой определенным порогом. На основе карты индекса сингулярности и пороговых значений ($\alpha < 1,943$), полученных в разделе 4.2, вероятность аномалии элемента Cu может быть рассчитана с помощью уравнения в разделе 2.3. Карта вероятности аномалий показывает тесную взаимосвязь между областями с высокой вероятностью аномалий и известными месторождениями меди (рис. 12).

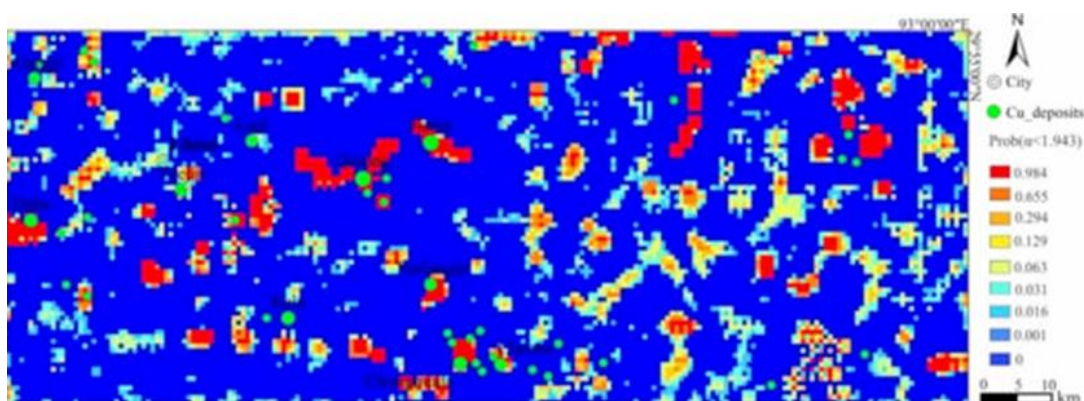


Рис. 12. Карты вероятностей геохимической аномалии с $\alpha < 1,943$.

Фактически, область с высокой вероятностью аномалий всегда находится на краю средне-кислых интрузий или на стороне разломов, которые являются благоприятными металлогеническими зонами в исследуемом районе. Сочетая геологический фон и благоприятные металлогенические условия, такие как интрузии средней кислотности, пересечение разломов и благоприятные осадочные породы, на рисунке 13 предложены несколько перспективных объектов ГРП.

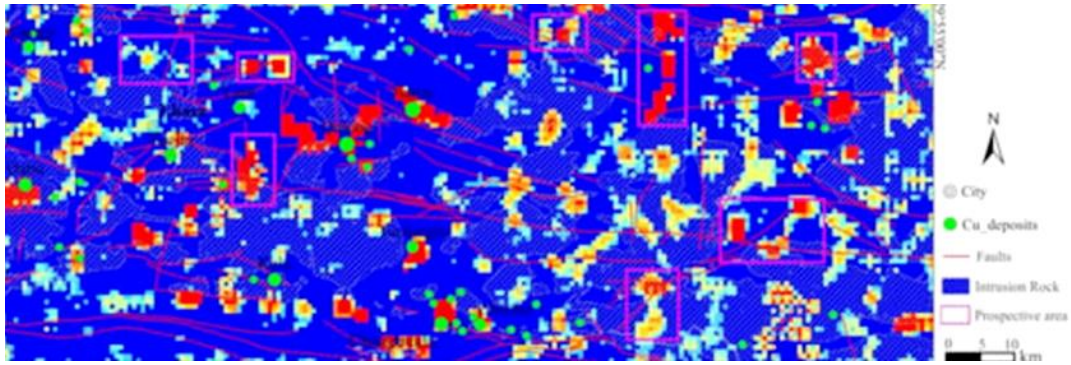


Рис. 13. Перспективные объекты ГРП.

5. Выводы.

1. В этом исследовании алгоритм прямой выборки и анализ локальных особенностей использовались для определения закономерностей геохимического распределения и оценки неопределенности геохимических аномалий. По сравнению с детерминированными методами (такими как кригинг), методы эффективно решают проблему эффекта сглаживания и неопределенности значений без выборки.

2. Оценка неопределенности аномалий по меди на основе данных о донных отложениях в исследуемом районе взята в качестве примера для проверки применимости методов. Многоточечное геостатистическое моделирование дало 200 реализаций с равной вероятностью, впоследствии были сгенерированы относительные карты LSA, а затем методом S-Q были рассчитаны два порога разделения α -значения E-типа, где $\alpha < 1,943$ было получено из сопоставления вероятности аномалии. Из вероятностной карты видно, что области с высокой вероятностью аномалий обычно распределены вблизи/на разломах или интрузиях и имеют тесную корреляцию с известными месторождениями. В соответствии с вероятностью аномалий и геологическими условиями были определены перспективные участки ГРП на рудные м-ния Cu и др.

ИСТОЧНИКИ:

1. Amirreza Bigdeli, Abbas Maghsoudi and Reza Ghezelbash. «RECOGNIZING GEOCHEMICAL ANOMALIES ASSOCIATED WITH MINERAL RESOURCES USING SINGULARITY ANALYSIS AND RANDOM FOREST MODELS IN THE TORUD-CHAHSHIRIN BELT, NORTHEAST IRAN». *Minerals* 2023, 13.
2. Cheng Li, Bingli Liu, Ke Guo, Binbin Li and Yunhui Kong. «REGIONAL GEOCHEMICAL ANOMALY IDENTIFICATION BASED ON MULTIPLE-POINT GEOSTATISTICAL SIMULATION AND LOCAL SINGULARITY ANALYSIS—A CASE STUDY IN MILA MOUNTAIN REGION, SOUTHERN TIBET». *Minerals* 2021, 11.
3. Fan Yang, Shuyun Xie, Zhihong Hao, Emmanuel John M. Carranza, Yuntao Song, Qingqing Liu, Renting Xu, Lanshi Nie, Wei Han, Chengwen Wang and Qiaolin Wang. «GEOCHEMICAL QUANTITATIVE ASSESSMENT OF MINERAL RESOURCE POTENTIAL IN THE DA HINGGAN MOUNTAINS IN INNER MONGOLIA, CHINA». *Minerals* 2022, 12.
4. Zhonghai Zhao, Kai Qiao, Yiwen Liu, Jun Chen and Chenglu Li. «GEOCHEMICAL DATA MINING BY INTEGRATED MULTIVARIATE COMPONENT DATA ANALYSIS: THE HEILONGJIANG DUOBAOSHAN AREA (CHINA) CASE STUDY». *Minerals* 2022, 12.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ СКРЫТЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Почти все месторождения, открытые к настоящему времени геохимическими методами, залегают на поверхности или вблизи поверхности и были обозначены и определены вторичными ореолами рассеяния или шлейфами в дренирующих отложениях, водах, почвах и растительности, то есть ареалы двумерной природы. Трехмерные съемки на основе первичных ореолов пока мало используются при поисках, хотя они предлагают множество новых подходов к обнаружению слепых месторождений во вмещающих породах или глубоко погребенных под чехлами.

Ореолы можно использовать как скалярные или векторные величины при поиске глубоко погребенных слепых месторождений. В первом случае появление ореола может просто указывать на возможное присутствие рудных тел; во втором случае площадное или трехмерное распределение ореолов может, по их увеличивающейся частоте и/или увеличению содержания, обеспечивать средства векторизации в очагах минерализации.

Литохимические исследования, предназначенные для обнаружения погребенных или слепых месторождений полезных ископаемых, в основном основаны на первичных ореолах. Они бывают двух видов - обволакивающие и просачивающиеся и служат рядом поисковых целей, в том числе (1) предоставление доказательств наличия рудной минерализации, (2) обозначение границ минерализации, (3) предоставление данных о переносчиках, которые указывают на продвижение к местам минерализации или отход от них и (4) обнаружение искомой цели (рудного тела).

В настоящее время предложены и внедрены различные фрактальные/мультифрактальные модели для характеристики геохимических аномалий, информирующих о минерализации, например, модель площади концентрации (C-A), модель спектральной области (S-A) и анализ локальной сингулярности (LSA). LSA был применен для характеристики геохимических аномалий, связанных с минерализацией. Его высокая эффективность в усилении и выявлении слабых аномалий на фоне высокой вариативности фона обусловлена его хорошей характеристикой особых геологических событий и/или процессов. LSA - это нелинейный метод, применяемый в среде ГИС, который исследует сингулярность путем анализа пространственных окон окрестностей. LSA позволяет избежать проблемы принятия глобально оптимальных пороговых значений, применимых к каждому местоположению, что является ограничением традиционных статистических методов. Он широко использовался в науках о земле для выявления слабых аномалий и улучшения данных ГИС в различных геологических

условиях. Становится все более важным внедрять инновации как в технологии глубокой разведки, так и в методы распознавания образов для обнаружения глубоко залегающих скрытых минеральных систем. Фрактальные/мультифрактальные методы получили дальнейшее развитие и в большей степени сосредоточены на обнаружении закономерностей, которые описывают или предоставляют информацию о глубоко залегающей скрытой минерализации.

Традиционные методы геохимических поисков не всегда эффективны при выявлении глубоко скрытых рудных объектов, тогда как фитогеохимические методы имеют явные преимущества. Корни растений могут проникать в мощные перекрывающие слои, поглощая воду, питательные вещества и минеральные элементы глубоко под землей, тем самым генерируя сигналы геохимических аномалий, которые дают ценную информацию о местонахождении рудных тел. Этот метод позволяет избежать необходимости обширной зачистки почвы или бурения, что делает его одновременно экологически чистым и экономически эффективным. Кроме того, обширная корневая система растений может указывать на присутствие рудных тел на гораздо более обширной территории. Фитогеохимические методы представляют собой потенциально эффективный подход, который уже успешно применяется при поиске скрытых месторождений в различных странах и регионах, демонстрируя уникальные преимущества.

Принцип метода поисков месторождений с помощью геогаза предполагает, что атомы Rn переносятся не только обычной диффузией, но, что более важно, восходящим газовым потоком, который переносит их вверх через различные геологические слои к поверхности. Геогазовый метод (NAMEG) был предложен в качестве эффективного инструмента при поисках скрытых рудных месторождений. Эта методология развивалась более 40 лет, и его принципы и методики постоянно совершенствовались.

I. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКИХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ (*Kumai*) [6]

1. Введение.

Геохимическая аномалия обычно описывается с точки зрения трех аспектов: концентрация (высокая/низкая), размер (большой/маленький) и набор элементов (один элемент/многоэлементный). Большинство геохимических аномалий характеризуются высокими концентрациями элементов, крупными размерами и совпадением комплексов элементов (аномалии высокого-крупного-совпадения). На этой основе в Китае выявлено большое количество рудных месторождений.

Малозаметная (тонкая) геохимическая аномалия, являющаяся противоположностью аномалии высокого-крупного совпадения, характеризуется низкой концентрацией, и/или малым размером, и/или неполным комплексом элементов (рис. 1).

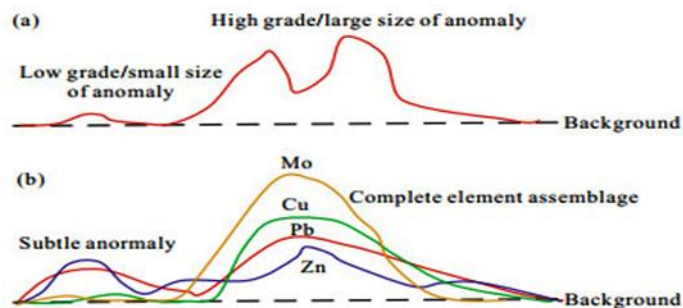


Рис. 1. Мультипликационная диаграмма малозаметной геохимической аномалии.

(а) низкая степень/небольшой размер аномалий; и (b) по сравнению с правыми аномалиями, левые слабые аномалии демонстрируют отсутствие аномалий Cu и Mo.

Из-за маскирующего эффекта различных покровов, скрытая минерализация обычно имеет малозаметные геохимические аномалии на поверхности. Поиск месторождений становится сложной задачей при обработке геохимических данных традиционными методами, не учитывающими локальную пространственную структуру геохимических закономерностей, в связи с чем полученные геохимические аномалии имеют тенденцию к подавлению или сглаживанию. Поэтому необходимы более совершенные подходы к обработке данных геохимических поисков.

Области со значениями металлов/элементов выше определенного порога представляют собой положительные геохимические аномалии. Отрицательные геохимические аномалии относятся к областям с содержаниями элементов, явно более низкими, чем средние фоновые концентрации (т.е. с сильным истощением концентраций металлов/элементов) (рис. 2).

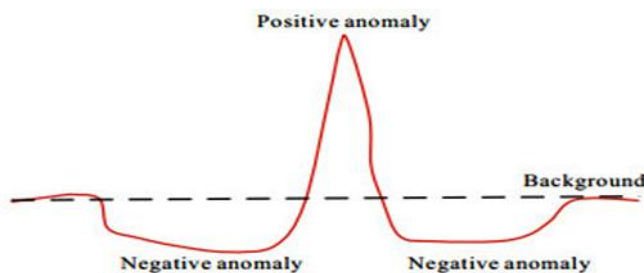


Рис. 2. Мультипликационная схема отрицательной геохимической аномалии.

Отрицательным геохимическим аномалиям традиционно не уделялось большого внимания при геохимических поисках по сравнению с положительными геохимическими аномалиями. В данном исследовании были обработаны два набора данных донных отложений для выявления малозаметных геохимических аномалий и разработки надежного индекса, который учитывает как положительные, так и отрицательные аномалии при геохимических поисках. Также рассмотрены возможности и проблемы оценки малозаметных геохимических аномалий в качестве поисковых признаков скрытого оруденения.

2. Исходные данные и методы.

Для изучения малозаметных и отрицательных геохимических аномалий были выбраны два рудных района (рис. 3). Исходные данные были собраны при плотности опробования 1 образец на км² и содержат концентрации 39 основных и микроэлементов.

Первый набор данных был собран из рудного района Гэцзю с крупными месторождениями олова скарнового типа (рис. 3а).

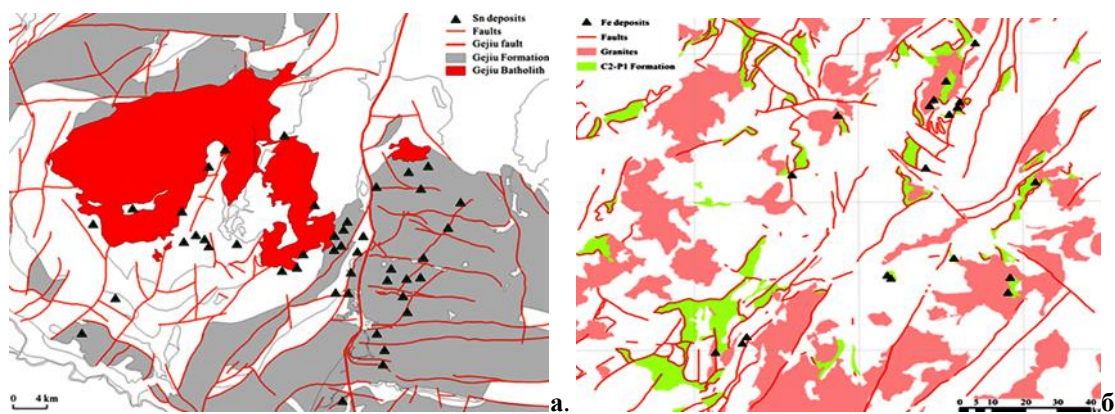


Рис 3. Геологические схемы: а. района Гэцзю (Sn м-ния); б. района Фуцзянь (Fe м-ния).

Ранее выполненные исследования выявили тесную пространственную взаимосвязь между геологическими факторами, такими как формация Гэцзю, батолит Гэйцзю и разломы северо-восточного и широтного простирания, и положением м-ний олова. Отмечается высокая концентрации оловорудных объектов в восточной части региона и низкая в западной.

Концентрации Sn и Cu определяли с помощью эмиссионной спектрометрии и рентгеновской флуоресценции, пределы обнаружения составляли 1 ppm.

Второй набор данных был собран в юго-западной части провинции Фуцзянь, где выявлен ряд железорудных месторождений также скарнового типа (рис. 3б).

Эти месторождения связаны с интрузиями, карбонатными образованиями каменноугольно-пермского возраста и разломами СВВ простирания. Показатели Na₂O, Ba и Mn были выбраны из набора данных, поскольку первые два элемента обеднены в магмо-гидротермальной рудной системе, а отношение Mn/Ba является поисковым геохимическим признаком. Концентрации Na₂O, Ba и Mn определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, пределы обнаружения Na₂O составляли 0,05%, Ba – 50 ppm, Mn – 30 ppm.

Методы выявления геохимических аномалий включают классический статистический анализ, анализ данных, одномерный/многомерный анализ, геостатистику, фрактальные/мультифрактальные модели и алгоритмы машинного обучения. Некоторые из этих методов могут применяться и для выявления малозаметных и отрицательных геохимических аномалий. Были использованы значения контраста в сочетании с методом скользящего среднего для определения отрицательных и положительных геохимических аномалий; и анализ локальной сингулярности для обнаружения тонких геохимических аномалий.

Традиционные методы разделения фоновых аномалий предполагают постоянный порог и, таким образом, не различают малозаметные геохимические аномалии. Напротив, мультифрактальные модели, такие как мультифрактальный анализ области спектра (SA), могут различать фоновые и аномальные компоненты на основе различных характеристик в частотной области.

Анализ SA основан на фрактальной модели концентрации-площади. Пространственные структуры сначала преобразуются из пространственной области в частотную с использованием преобразования Фурье, затем строится логарифмический график зависимости спектральной плотности (S) от площадей (A) со спектральной плотностью больше, чем S. N прямых ($N \geq 2$) строится на основе графика SA с помощью метода наименьших квадратов. N прямых линий определяют N+1 фильтров, чтобы разделить исходную карту на несколько компонентов. Карты геохимических аномалий и компонентов фона могут быть получены путем перевода каждого из этих компонентов из частотной области в пространственную с использованием обратного преобразования Фурье.

Площадь под кривой рабочей характеристики приемника (AUC) используется для оценки пространственной корреляции между изучаемой геохимической картиной и расположением

известных месторождений. Значение AUC колеблется от 0 до 1. $AUC > 0,5$ предполагает положительную пространственную корреляцию, $AUC < 0,5$ указывает на отрицательную пространственную корреляцию. Чем больше AUC, тем сильнее пространственная корреляция.

3. Результаты.

3.1 Тонкие геохимические аномалии оловянного оруденения.

Для обработки данных использовалось преобразование изометрического логарифмического отношения (ILR). Затем был использован метод обратного взвешивания расстояния для интерполяции исходных точечных данных в растровые карты с размером ячейки 1x1 км. Пространственное распределение олова и меди в восточной части района Гэцзю показывает, что наблюдаются высокие аномалии Sn и Cu, западная часть характеризуется относительно низкими аномалиями Sn и Cu и небольшим количеством месторождений. Таким образом, традиционные частотные методы могут обнаруживать геохимические аномалии на востоке, но не могут различать малозаметные (тонкие) геохимические аномалии на западе (рис. 4).

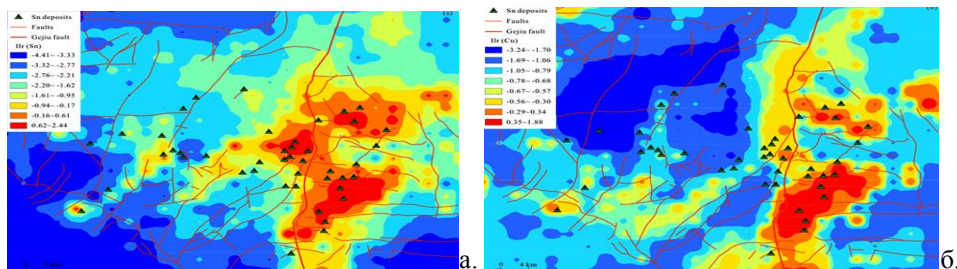


Рис. 4. Карты распределения (а) Sn и (б) Cu.

Модель SA применялась для разложения карт Sn и Cu на фоновую и аномальную составляющие и выделения тонких геохимических аномалий, связанных с оловянным оруденением.

Фоновые карты Sn и Cu демонстрируют аналогичную картину - большинство аномальных значений Sn и Cu на востоке района. В восточной части района фоновые значения Sn и Cu выше, чем в западной (рис. 5).

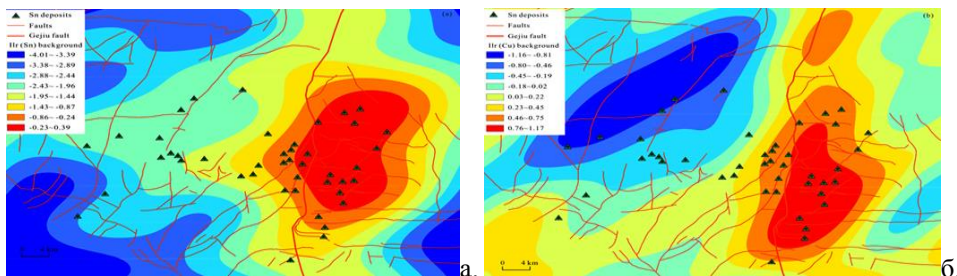


Рис. 5. Карты геохимического фона для Sn (а) и Cu (б).

На рисунке 6 показаны малозаметные (тонкие) геохимические аномалии в западной части района, где были выявлены месторождения.

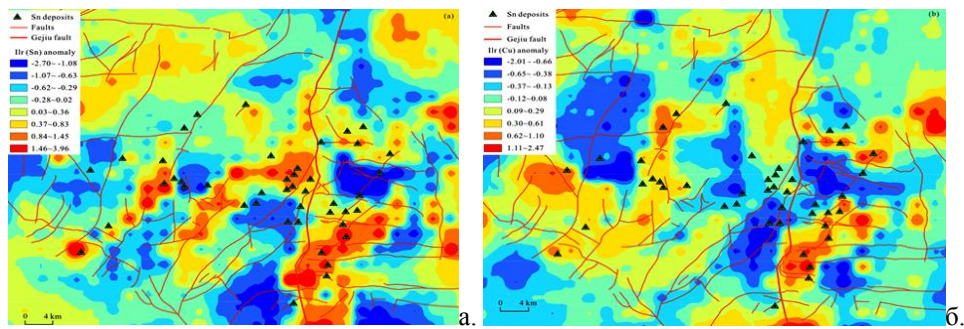


Рис. 6. Карты тонких геохимических аномалий Sn (а) и Cu (б).

3.2 Отрицательные геохимические аномалии железорудных объектов.

Пространственное распределение Na_2O и Ba показывает, что большая часть известных железорудных объектов находится в областях с низкими концентрациями Na_2O и Ba. AUC Na_2O (0,263) и Ba (0,224) ниже 0,5, что указывает на то, что пространственные структуры Na_2O и Ba отрицательно коррелируют с расположением оруденения Fe. В отличие от Na_2O и Ba, высокие значения Mn (AUC Mn составляет 0,853) указывает на сильную положительную связь Mn с пространственным распределением железорудной минерализации (рис. 7).

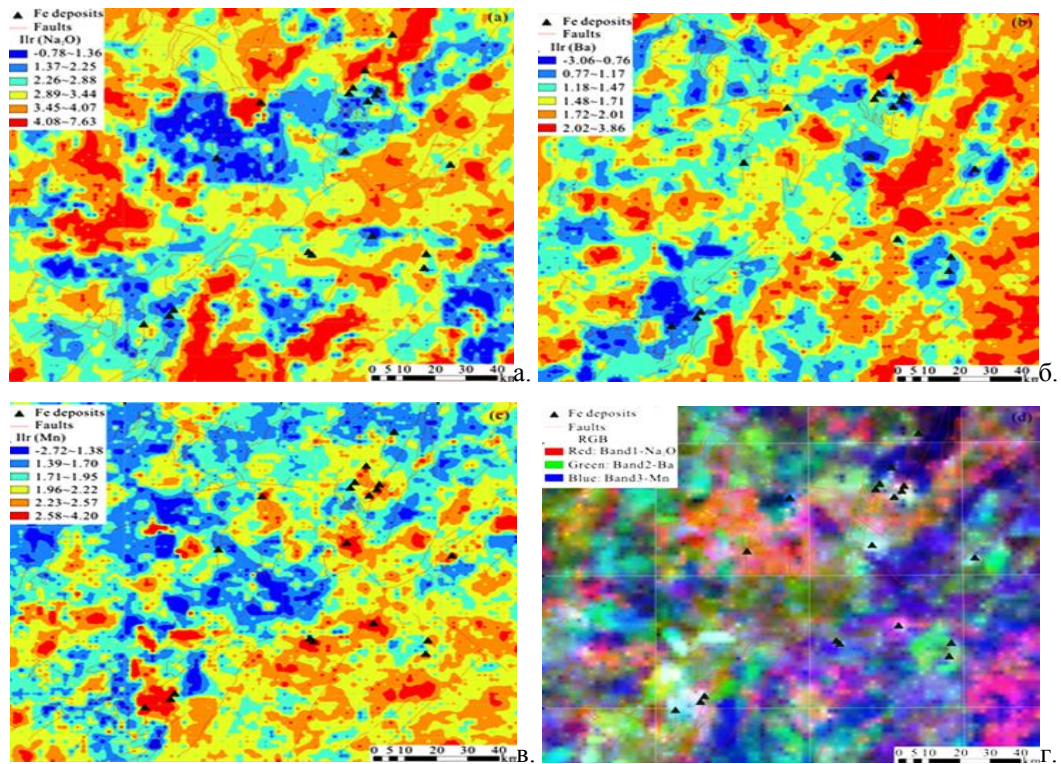


Рис. 7. Карты распределения: (а) Na_2O , (б) Ba, (в) Mn и (г) интегрированного RGB Na_2O , Ba и Mn.

Модель сочетания цветов RGB характеризуется тремя цветами (красным, зеленым и синим). Каждый находится в диапазоне от 0 до 255. Было создано цветное составное изображение, объединяющее Na_2O , Ba и Mn (рис. 7г), Оно представляет собой три альтернативные геохимические модели вместе: карты Na_2O (рис. 7а), Ba (рис. 7б) и Mn (рис. 7с) с использованием метода равноинтервальной классификации с помощью ArcGIS. Известная

железорудная минерализация встречается либо вокруг участков белого цвета (с низким содержанием Na_2O и Ва и с высоким содержанием Mn), либо голубого (с низким содержанием Ва и высоким содержанием Mn), желтого (с низким содержанием Na_2O и Ва) и пурпурного (с низким содержанием Na_2O и с высоким содержанием Mn). Эта модель включает три исходные, которые положительно и отрицательно коррелируют с известной минерализацией и, следовательно, может предоставить больше информации, чем одна.

Карты фона и аномалий Na_2O и Ва, полученные с помощью анализа СА, показывают тесную пространственную связь с железорудной минерализацией, большей частью с низким фоном и аномальными значениями Na_2O и Ва (рис. 8, 9).

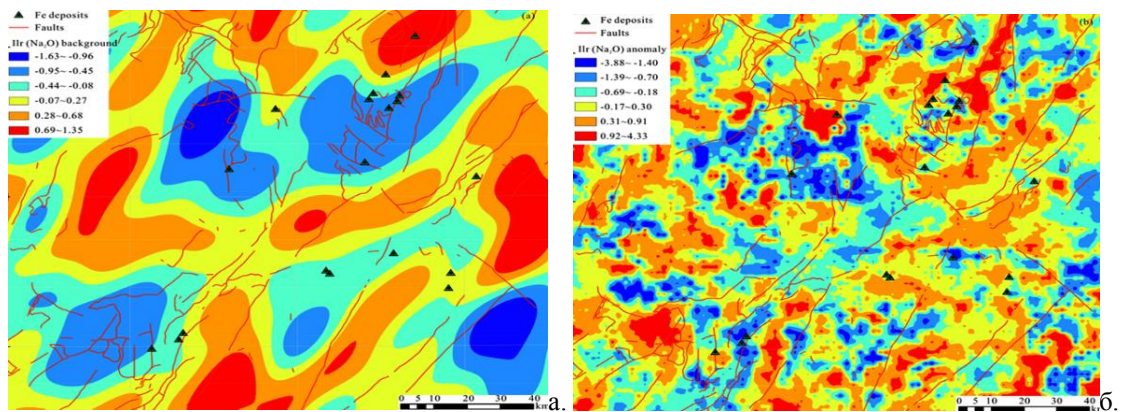


Рис. 8. Карты геохимического фона (а) и аномалий Na_2O (б).

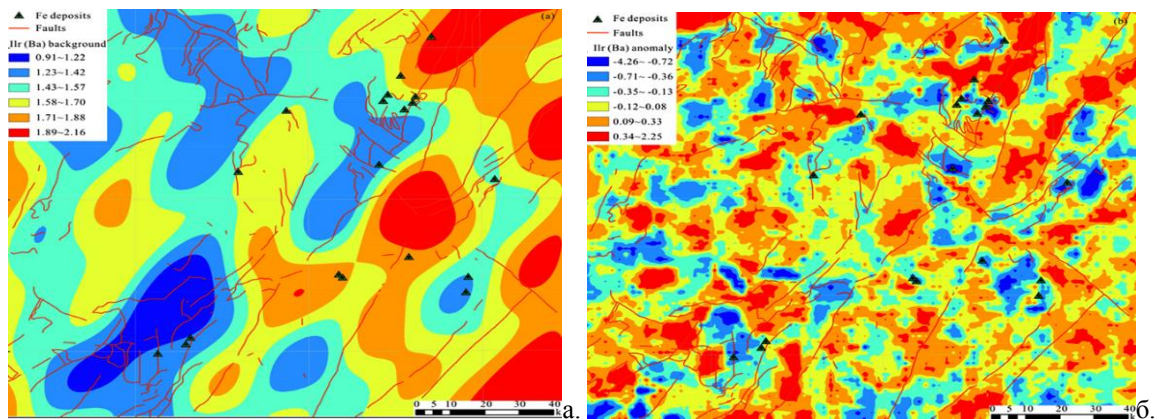


Рис. 9. Карты геохимического фона (а) и аномалий Ва (б).

Новый AUC индекс отношения Mn/Ba достигает 0,861, что указывает на сильную пространственную связь с известной железорудной минерализацией. При этом значение AUC отношения Mn/Ba больше, чем у Mn (0,853), а показатель отношения Mn/Ba может выделить зоны взаимодействия гидротермального флюида с вмещающей породой (рис. 10a). Белые, голубые, желтые и пурпурные пятна (рис. 10b) имеют тесную пространственную связь с известной минерализацией, что указывает на то, что такая составная карта, объединяющая положительные и отрицательные геохимические аномалии, может выделять минерализованные

зоны и, следовательно, может предоставить ценную поисковую информацию. Составное изображение (рис. 10с) показывает геохимический фон Na_2O , Ва и Мп, который демонстрирует ССВ направление, аналогичное тренду разломов, что означает, что региональные разломы могут контролировать пространственное распределение геохимических структур этих элементов, а известное оруденение Fe развивается на участках, связанных с низким содержанием Na_2O и Ва, но высоким содержанием Мп.

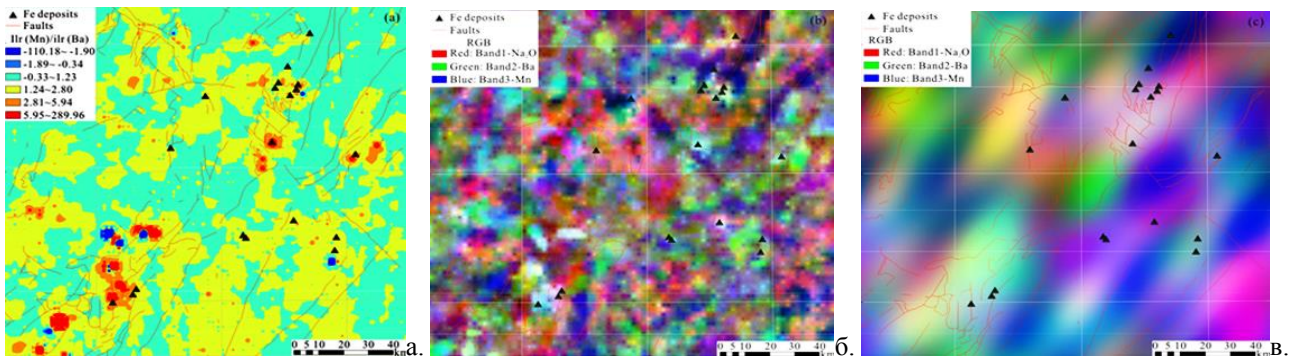


Рис. 10. Карты геохимических структур: (а) Мп/Ва, (б) RGB-интеграция аномальных карт Na_2O , Ва и Мп и (с) RGB-интеграция фоновых карт Na_2O , Ва и Мп.

Карты фоновой и аномальной составляющих Мп/Ва были получены путем разукрупнения исходной карты Мп/Ва с использованием СА-анализа (рис. 11).

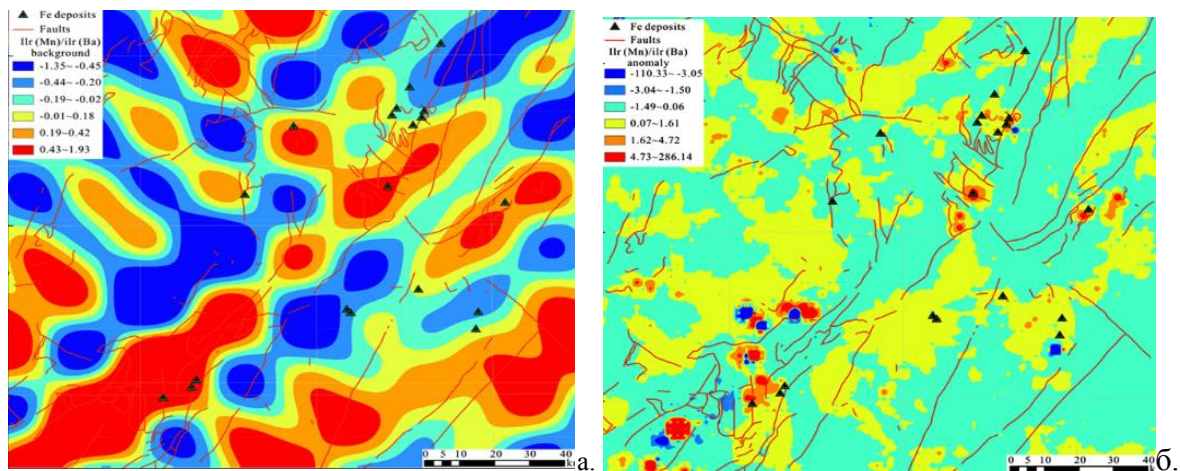


Рис. 11. Карты геохимического фона (а) и аномалий Мп/Ва (б).

Пространственная связь фонового содержания Мп/Ва с положением известных месторождений неясна. Однако положительные аномалии Мп/Ва (рис. 11б) демонстрируют пространственную связь с известной минерализацией. Эти результаты показывают, что отношение Мп/Ва, полученное путем деления положительных аномалий Мп на отрицательные аномалии Ва, является надежным показателем для выделения перспективных площадей дальнейших поисков железорудных объектов.

4. Обсуждение.

4.1 Тонкие геохимические аномалии.

Количественная оценка и прогнозирование скрытых м-ний является важной, но сложной задачей, требующей выявления и оценки малозаметных геохимических аномалий. Требуется выявление и оценка малозаметных геохимических аномалий с использованием передовых подходов, таких как фрактальные/мультифрактальные модели с поддержкой географической информационной системы (ГИС) и алгоритмов машинного обучения. В настоящее время известно несколько успешных тематических исследованиях, направленных на идентификацию скрытых рудных месторождений посредством анализа малозаметных геохимических аномалий, как например, зоны полиметаллического, оловорудного и серебряного оруденения во Внутренней Монголии и Португалии.

Между тем, существуют несколько проблем в выявлении и оценке малозаметных геохимических аномалий.

Первая - заключается в распознавании тонких геохимических признаков, связанных с минерализацией. Тонкие аномалии могут содержать информацию о слабой минерализации и шумах, полученную при отборе проб или обработке данных, то время как информация о магмо-гидротермальных рудных системах, обычно контролируется геологическими особенностями и, следовательно, может иметь специфический характер пространственного распределения.

Второй проблемой является разделение скрытого промышленного оруденения от низкосортной минерализации. Связанные с ними два типа малозаметных геохимических аномалий трудно различить, поскольку они имеют схожие геохимические характеристики. Продуктивные малозаметные геохимические аномалии можно подтвердить с использованием геофизических данных.

Третьей задачей является оценка глубины залегания оруденения геохимическими методами. Обычно применяются различные геофизические методы для прогнозирования и определения формы и местоположения рудных тел. Эти параметры трудно определить геохимическими методами. В последние годы достигнуты определенные успехи в изучении вертикального распределения геохимических элементов. Если известны содержания рудной залежи и оконтурена средняя концентрация геохимических аномалий на поверхности, то можно оценить глубину залегания на основе степеней зависимости между концентрацией и глубиной.

В последние годы внимание сосредоточено на аналитике больших данных и алгоритмах глубокого обучения в области геохимических поисков. Аналитика больших данных представляет собой новый подход к данным геохимических поисков, который учитывает все

геохимические переменные при выявлении корреляций между геохимическими моделями и прогнозируемым оруденением. Алгоритмы глубокого обучения, как своего рода многослойная нейронная сеть, могут определять оптимальное представление сложных геохимических закономерностей и, следовательно, могут выявлять скрытые геохимические закономерности, связанные с оруденением. Аналитика больших данных и глубокое обучение могут являться инновационными методами для извлечения продуктивных малозаметных геохимических аномалий и уменьшения влияния шумов при формировании поисковых геохимических комплексов.

4.2 Отрицательные геохимические аномалии.

Обогащение и обеднение определенными металлами/элементами при формировании рудных м-ний отображаются положительными и отрицательными геохимическими аномалиями и охватывают верхний и нижний диапазон распределения геохимических данных соответственно. Ba, Sr, P, Y, Ti, Zr, Cr вытесняются из рудного тела при формировании скарновых м-ний, а Na может образовываться в виде отрицательных геохимических аномалий. Ba можно рассматривать как элемент-индикатор, потому что он обычно перемещается из рудного тела и осаждается на периферии, Величина отрицательной геохимической аномалии корректируется с глубиной залегания рудного тела, что позволяет разработать индекс для оценки глубины денудации м-ния. Отрицательные аномалии могут быть определены с использованием тех же методов, которые используются для выявления положительных аномалий, таких как мультифрактальная модель SA.

Положительные и отрицательные аномалии имеют разную пространственную структуру, отражающую разные геологические процессы. Три возможных пространственных положения отрицательных и положительных одноэлементных аномалий: (1) отрицательные аномалии, сопровождаемые положительными аномалиями; (2) только положительные аномалии без отрицательных аномалий; и (3) только отрицательные аномалии без положительных. Первое представляет собой положительную корреляцию между отрицательными и положительными аномалиями, предполагая, что концентрация рудного элемента могла иметь место в результате процессов латеральной секреции. Второе - что рудообразующий флюид, сформировавший положительные аномалии, вероятно, происходит не из окружающих пород, а из более глубоких источников. Третье - может свидетельствовать о том, что образование аномалий связано с литогенезом.

Отношения элементов, образующих положительные аномалии, к элементам, образующим отрицательные аномалии, могут являться поисковыми признаками и должны быть дополнительно исследованы. В данном исследовании отношение Mn/Ba, где Mn и Ba образуют

соответственно положительную и отрицательную аномалии, может быть использовано в поисковых целях.

II. МЕТОДЫ СИНГУЛЯРНОСТИ И ЗОНАЛЬНОСТИ ПРИ ПОИСКАХ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ [7]

1. Введение.

В целом, построение карт сингулярности улучшает выявление относительно слабых аномалий концентраций металлов в сложных геологических условиях. Сингулярность используется в ситуациях значительного перекрытия фоновых и аномальных значений или слабых аномальных значений, скрытых в сильной дисперсии фоновых значений. В данном исследовании метод сингулярности в комбинации с методом зональности применялся при поисках скрытой медной минерализации.

Первичные ореолы месторождений, образующиеся в результате взаимодействия вмещающих пород с рудообразующими флюидами, характеризуются обогащением/обеднением элементами/металлами. Индексы V_z , определяющие над- и подрудные ореолы, являются полезными инструментами для картирования перспективности. Они показывают уровень минерализации и его первичные (надрудные и подрудные) ореолы. Модель уровня месторождения по трём индексам V_z представлена на рисунке. 1.

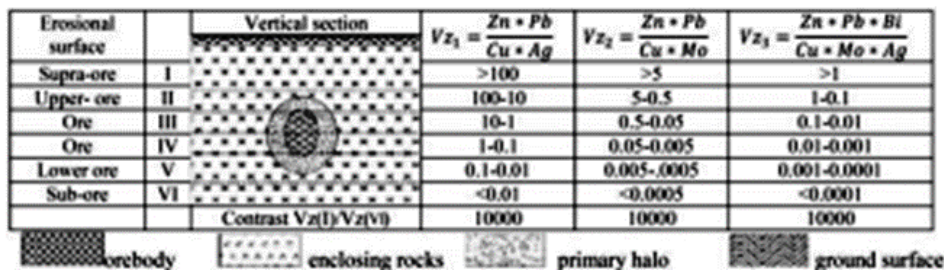


Рис. 1. Модели вертикальной геохимической зональности (V_z) для медно-порфировых м-ний Казахстана, Болгарии, Армении и Ирана.

В отличие от других статистических методов, метод сингулярностей представляет собой метод мягких порогов для выявления геохимических аномалий. Этот метод использует локальные динамические пороги в исследуемой области, а также некоторые контрастные карты сингулярностей на основе окон.

Анализ сингулярностей может быть использован на основе непрерывного паттерна для характеристики геохимических аномалий, в которых количество элементов в отложениях имеет парето-хвост.

Сингулярность элемента рассчитывается на основе среднего значения концентрации элемента $C(A)$ в различных размерах A с помощью аппроксимации прямой линии методом наименьших квадратов (LS) в логарифмическом масштабе. Эти уравнения имеют следующий вид:

$$C(A) = cA^{a/2-1} \quad (1)$$

$$\log C[A(r_i)] = C_0 + (\alpha - 2) \log(r_i) \quad (2)$$

где, $C(A)$ – концентрация металла в области A размером r_i ,
 C и C_0 – константы, α – показатель степени степенной зависимости.

Согласно уравнению (1), зависимость $\log(C)$ от $\log(r_i)$ представляет собой прямую с наклоном $\Delta\alpha = \alpha - 2$ и пересечением с осью y линии C_0 . Положительное значение наклона прямой ($\Delta\alpha > 0$) указывает на истощение элементов и наоборот. Таким образом, места, где их сингулярность ниже 2 ($\alpha < 2$), указывают на обогащение элементов концентрацией. Другие места, где $\alpha > 2$, указывают на истощение концентрации элемента.

2. Геологическая обстановка.

Район исследования расположен в южной части Центрально-Иранской вулканоплутонической магматической дуги (рис. 2).

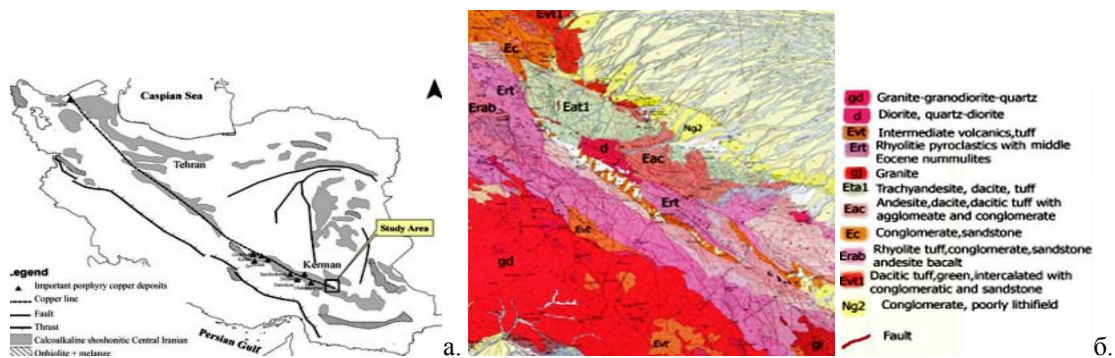


Рис. 2. Схема пояса Саханд-Басман (а) и геологическая схема района Джебель-Барез (б).

Большинство выявленных медно-порфировых месторождений в этом районе имеют скрытый характер. Они сопровождаются гидротермально-метасоматическими изменениями, демонстрирующими значительные различия в содержании основных оксидов и микроэлементов и отражающими различные вариации минералогического и геохимического состава гидротермально измененных зон, представленных пропилитовыми, аргиллитовыми, кремнистыми, калиевыми, алунитовыми и оксидными разновидностями. Минерализация представлена пиритом, малахитом, азурином, халькопиритом, борнитом, оксидами железа и марганца.

3. Метод сингулярности и анализ данных.

В данном исследовании было отобрано 669 проб речных отложений. Площадь исследуемой территории составляет 2500 км², одна проба на 3–4 км². Образцы анализировались на содержание Cu, Zn, Ag, Pb, Au, W, As, Hg, Ba, Bi методом атомной абсорбции.

Расчеты карты сингулярности были реализованы в программном обеспечении MATLAB. Последовательность алгоритмов:

- 1) Создание карты сетки методом интерполяции кригинга.
- 2) Задание семи окон размером от 1×1 до 13×13 км².
- 3) Усреднение среднего значения концентрации элемента для всех образцов, попадающих в окно каждого размера.
- 4) Генерация двух наборов значений: среднее значение концентрации $C[A(r_i)]$ и размер окна $r_i (i=1, \dots, 13)$, для каждого размера окна.
- 5) Построение прямой линии для $C[A(r_i)]$ и r_i (рассчитанных на предыдущем шаге) на графике в двойном логарифмическом масштабе с помощью метода наименьших квадратов.
- 6) Выявление наклона прямой линии, которая показывает значение $\alpha-2$.

4. Результаты сингулярности и вертикальной зональности.

Карта сингулярностей представлена на рисунке 5. Она иллюстрирует, что сингулярность Cu на месторождениях Кервер и Сангестан превышает 2, и эти месторождения обеднены Cu . Эти два месторождения являются важнейшими скрытыми минерализациями в районе Джебель-Барез, что также подтверждено пробуренными скважинами; следовательно, уникальность Cu в этом случае дает неверные результаты при разведке скрытого оруденения.

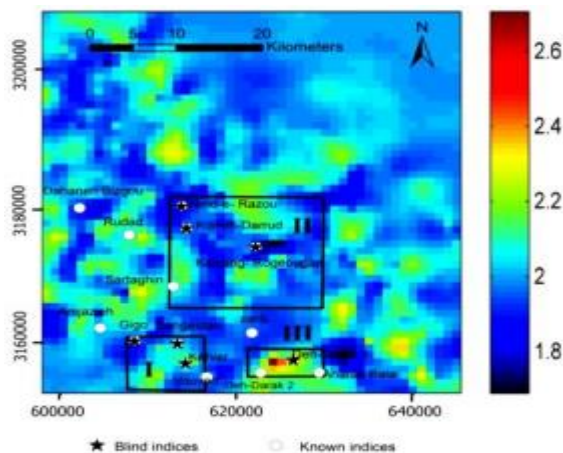


Рис. 5. Карта сингулярностей значения концентрации Cu в Джебель-Барезе.

Было предложено использовать вертикальную зональность вместо концентрации Cu для выявления скрытой минерализации. Среди индексов V_z , представленных на рисунке 1, V_{z1} (или $Zn \times Pb / Cu \times Ag$) является наилучшим индикатором скрытых медно-порфировых месторождений (т.е. не обогащенных вторичными металлами, такими как Mo или Au).

Значение сингулярности ниже 2 в нескольких частях Джебель-Барез, что означает обогащение индекса V_z в этих частях. Низкое значение сингулярности V_z наблюдается на юге в подрайоне I. В этой части района расположены два важных месторождения Джебель-Барез. М-ния Кервер и Сангестан являются скрытыми, что доказывает благоприятность подрайона I

для поисков скрытой порфировой медной минерализации. Наличие скрытой медно-порфировой минерализации было подтверждено скважинами (рис. 6).

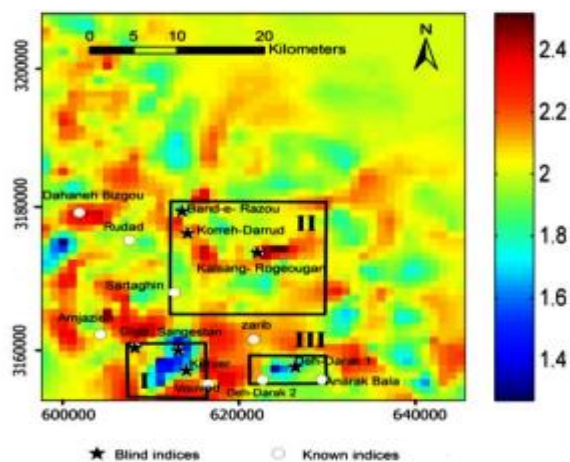


Рис. 6. Карта сингулярностей значения $Pb \times Zn / Cu \times Ag$ в Джебель-Барезе.

Для количественного измерения пространственной корреляции между областями со значениями α менее 2 и семью известными скрытыми минерализациями, был применен метод весов доказательств.

На рисунке 7 представлен график зависимости t-критерия от значения сингулярности. Этот график показывает, что корреляция между t-критерием и значением α максимальна при $\alpha = 1,65$ (1,65 меньше 2), и t-критерий уменьшается с увеличением α . Максимальное значение t-критерия составляет 4,52, достигаемое при $\alpha = 1,65$ (рис. 7).

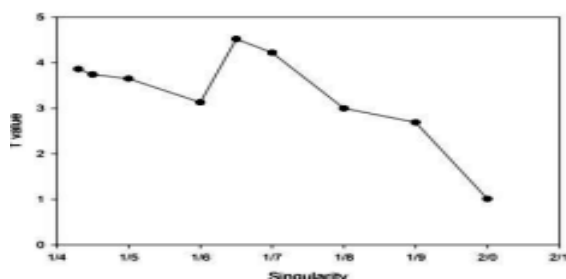


Рис. 7. t-критерий Стьюдента, рассчитанный с помощью метода весов доказательств для измерения пространственной корреляции между 7 м-ниями Cu и территориями со значением α ниже переменных порогов, выраженными вдоль оси x .

Карта сингулярности бинарности для $\alpha < 1,65$ показывает существующее скрытое оруденение в южных частях региона (рис. 8).

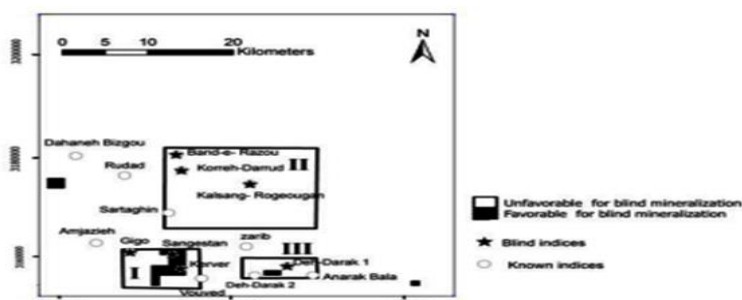


Рис. 8. Бинарные карты сингулярности для значения $\alpha < 1,65$.

Был использован метод WofE и определены подрайоны I и II как высокопотенциальные участки для скрытого оруденения. Используя метод Fuzzy были получены те же результаты. Согласно данным скважин, пробуренным в районе Джебель-Барез, в подрайоне I присутствует скрытое оруденение. В подрайоне II скрытого оруденения не обнаружено (табл. 1).

Табл. 1

Характеристики индексов скрытого оруденения в Джебель-Барезе и прилегающих районах

Indices	Subarea	Geology	Singularity of Vz index	Blind indices base of:			Singularity method in this study
				WofE Method [19]	Fuzzy method [31]	Drilling Borehole [33]	
Gigo	I	Granite-Granodiorite-quartz-diorite (JebelBarez granite)	>1.65	*	*	*	-
Sangestan	I		<1.65	*	*	*	*
Kerver	I		<1.65	*	*	*	*
Deh-Darak1	III	Porphyrite with contact phenomena(P)	>1.65	*	-	-	-
Band-e- Razou	II	Rhyoliticpyroclastics (Ert)	>1.65	*	-	-	-
Korreh-Darrud	II		>1.65	*	*	-	-
KalsangRogeougan	II	Agglomerat,ash,tuff (Eta3) Dacite pyroclastic	>1.65	*	-	-	-

5. Выводы.

Целью данного исследования было обнаружение скрытой минерализации в районе Джебель-Барез на юге Ирана. Месторождения скрытых минералов и связанные с ними первичные ореолы характеризуются вариациями химического состава по вертикали. Паттерны Vz вокруг обнаженных месторождений отличаются от паттернов, связанных со скрытыми месторождениями. В данном исследовании индекс Vz (Pb.Zn/Cu.Ag) интегрирован с методом сингулярности для лучшего понимания обогащения индекса Vz.

Результаты показали, что обогащение индекса Vz является основной скрытой минерализацией этого района.

По результатам данного исследования предлагается использовать сингулярность аномалий геохимической зональности вместо интерполяции контуров в качестве одного из поисковых признаков рудных месторождений.

III. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИЧНЫХ ОРЕОЛОВ И ИХ ПОИСКОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ (*Cu-Mo м-ние Кулонг, Тибет*) [8].

1. Введение.

Анализ первичных геохимических ореолов является важным и мощным методом поисков скрытых рудных месторождений. На основе анализа геохимических характеристик первичных ореолов была создана модель формирования выявленных рудных тел м-ния Кулонг с целью поисков скрытого оруденения.

Медно–порфировое месторождение Кулонг расположено в Тетис-Гималайской металлогенической области, одной из трех основных металлогенических областей порфиров в мире. С 2001 года были выявлены крупные порфировые медно-молибденовые месторождения, включая Кулонг, Чунцзян, Сюнчунь и Чжунуо, что ознаменовало крупный прорыв в поисках рудных месторождений на Тибетском плато (рис. 1).

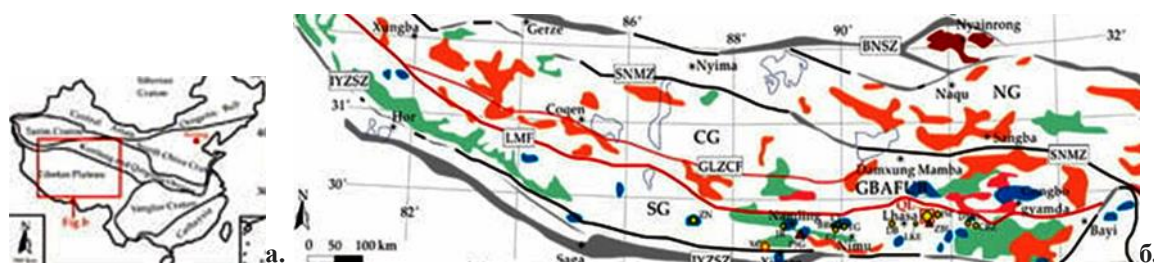


Рис. 1. а. региональная схема; б. основные Cu–Mo (Au) м-ния на Тибетском плато.

Метод первичного ореола, также известный как метод петрогеохимической съемки, является эффективным методом поиска скрытых гидротермальных месторождений. Первичные геохимические ореолы, возникающие в результате взаимодействия вмещающих пород и минерализующих флюидов, характеризуются истощением или обогащением металлов или связанных с ними микроэлементов. Эти ореолы подразделяются на три типа, включая осевую, продольную и поперечную зональности, в которых осевая зональность играет важную роль при поисках рудных месторождений из-за ее взаимосвязи с направлением движения рудообразующих флюидов.

2. Геология и минерогения месторождения.

Породы на месторождении в основном относятся к среднеюрской формации Йеба и четвертичным отложениям, на долю которых приходится около 75,5% от общей площади. Формация Йеба является основной стратиграфической единицей района. Она представлена совокупностью вулканических и пирокластических осадочных пород. Основными рудовмещающими структурами являются трещинные системы (рис. 2).

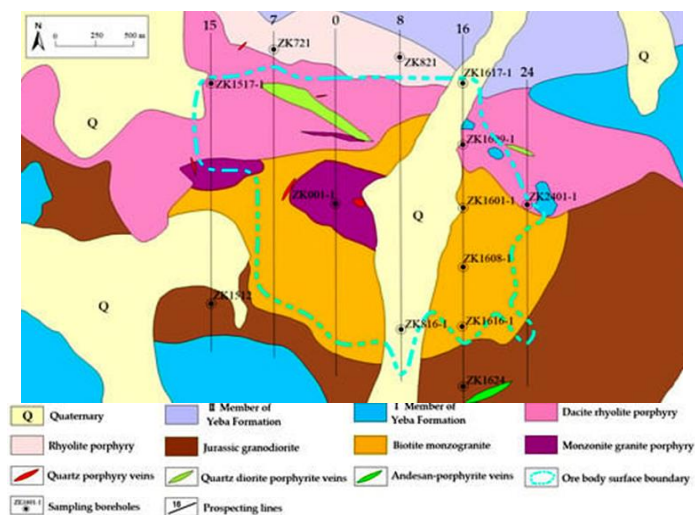


Рис. 2. Упрощенная схема м-ния Кулонг, показывающая расположение поисковых линий.

В целом, медно-молибденовое месторождение Кулонг является скрытым. Рудное тело в основном распределено между линиями разведки № 15-20 (рис. 2), шириной около 1000 м с севера на юг и длиной около 1800 м с востока на запад. Оно образует единое целое в плоскости и вертикальном направлении. Это неправильной формы цилиндр, который простирается на глубину почти вертикально.

Интрузивные породы раннего рудообразующего периода представляют собой в основном биотитовые монцограниты, порфировидные биотитовые монцограниты и гранодиориты, известные как комплекс Ронгмукуола. Рудообразующий порфир в основном представлен монзонитово-гранитным порфиром и гранит-порфиром. Интрузивными породами поздней стадии минерализации являются гранодиориты и аплитовые жилы. Общая схема типов интрузивных пород, сформировавшихся в течение миоцена в районе Кулонг, от раннего до позднего, следующие: гранодиорит → биотит-монцогранит → монцогранит, гранитный порфир → гранодиорит-порфир → мелкокристаллический кварцевый диорит порфир.

3. Материалы, методы обработки и анализа данных.

В общей сложности из скважин разведочной линии № 16 было отобрано 5614 образцов керна с интервалами отбора проб в 1 м. Собранные образцы были протестированы в полевых условиях с использованием ручного рентгенофазового анализатора. Из-за предельной точности самого прибора, согласно фактическим результатам испытаний и методу Delphi, для исследования и анализа был отобран 31 элемент: Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Au, W, Bi, Hg, As, Sn, Sb, Cd, Cs, Ba, Nb, Ni, Rb, Sr, Zr, Th, Te, Fe, Mn, Ti, Ca, K, Al, Si, P и S.

Для выявления ассоциаций элементов-индикаторов были использованы три метода анализа (корреляционный, кластерный и факторный).

Корреляционный анализ.

Чтобы исключить влияние чрезвычайно высоких значений и уменьшить асимметрию исходных данных, было принято преобразование $\log 10$, и была рассчитана матрица коэффициентов корреляции (табл. 1).

Табл. 1.

Корреляции между основными рудообразующими элементами и коэффициентами корреляции.

	Cu	Mo	Pb	Zn	Ag	Au	W	Bi	As	Sn	Sb	Cd	Ba	Ni	Rb	Fe	Mn	S
Cu	1.000																	
Mo	0.466**	1.000																
Pb	0.326**	0.234**	1.000															
Zn	0.368**	0.133**	0.616**	1.000														
Ag	0.253**	0.228**	0.119**	0.067**	1.000													
Au	0.112**	0.069**	0.025	0.031*	-0.014	1.000												
W	0.429**	0.214**	0.181**	0.214**	0.060**	0.106**	1.000											
Bi	0.023	0.012	0.155**	0.106**	-0.120**	0.041**	0.169**	1.000										
As	0.251**	0.198**	0.397**	0.484**	0.024	0.024	0.184**	0.165**	1.000									
Sn	0.177**	0.240**	0.075**	-0.004	0.649**	-0.009	0.001	-0.168**	0.010	1.000								
Sb	0.171**	0.198**	0.089**	0.047**	0.607**	0.010	-0.043**	-0.253**	0.054**	0.899**	1.000							
Cd	0.150**	0.206**	0.084**	0.046**	0.591**	-0.008	-0.033*	-0.199**	-0.011	0.744**	0.738**	1.000						
Ba	0.115**	0.193**	0.111**	0.035*	0.291**	0.065**	0.092**	0.020	-0.073**	0.521**	0.435**	0.440**	1.000					
Ni	0.142**	0.019	0.103**	0.163**	0.081**	0.097**	0.080**	-0.114**	0.069**	0.197**	0.227**	0.146**	0.272**	1.000				
Rb	0.337**	0.236**	0.320**	0.277**	0.012	0.145**	0.335**	0.209**	0.414**	-0.049**	-0.065**	-0.087**	0.134**	0.047**	1.000			
Fe	0.241**	-0.006	0.148**	0.366**	-0.028*	0.038**	0.253**	0.138**	0.207**	-0.094**	-0.139**	-0.126**	0.152**	0.261**	0.150**	1.000		
Mn	-0.071**	-0.154**	0.183**	0.484**	-0.078**	-0.013	0.008	0.055**	0.357**	-0.109**	-0.036**	-0.059**	0.054**	0.230**	0.203**	0.345**	1.000	
S	0.396**	0.326**	0.090**	-0.029	0.220**	0.080**	0.247**	0.075**	0.084**	0.334**	0.186**	0.113**	0.144**	0.102**	0.226**	0.155**	-0.231**	1.000

** Correlation significant at 0.01 level (bilateral). * Correlation significant at 0.05 level (bilateral).

Коэффициент корреляции, превышающий критическое значение ($n = 5614$, уровень достоверности = 0,01, критическое значение = 0,053), указывает на значительную корреляцию. Cu, Mo, Pb, Zn, Ag и S, которые являются основными рудообразующими элементами, показали значительную корреляцию. Cu имела наилучшую корреляцию с Mo, W, S, Zn, Rb и Pb и значительную отрицательную корреляцию с Mn. Mo имел наилучшую корреляцию с S, Sn, Rb, Pb, Ag, W и Cd и значительную отрицательную корреляцию с Mn. Pb имел наилучшую корреляцию с Zn, As и Rb. Zn имел лучшую корреляцию с As, Mn, Fe, Rb и W. Ag имело наилучшую корреляцию с Sn, Sb, Cd, Ba и S и значительную отрицательную корреляцию с Bi, Mn и Fe. Согласно приведенным результатам, W, Sb, Cd и Ba могут быть использованы в качестве характерных элементов-индикаторов месторождения Кулонг.

Кластерный анализ.

Коэффициент корреляции Пирсона был использован для кластерного анализа 31 элемента R-типа, и было получено дерево кластеризации (рис. 3).

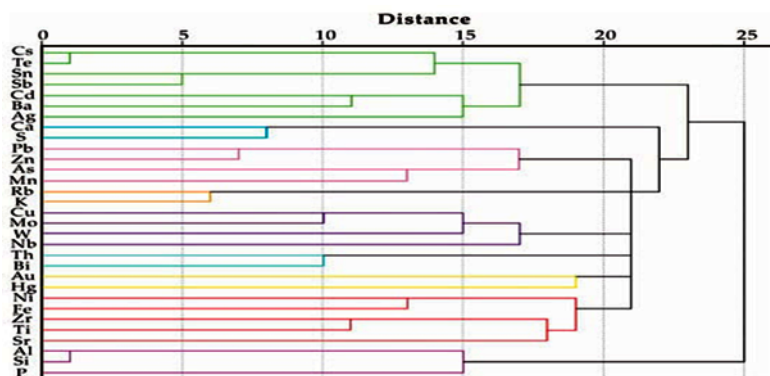


Рис. 3. Дендрограмма элементов типа R.

При уровне корреляции 0,3 в качестве границы коэффициент расстояния составлял 20, и элементы можно было разделить на девять категорий. Cs, Te, Sn, Sb, Cd, Ba и Ag представляют собой типичную комбинацию элементов с низкой и средней температурой. Ca и S относятся к одной категории, что предполагает тесную взаимосвязь между ангидритом и минерализацией. Pb, Zn, As и Mn принадлежат к одному классу. Rb и K относятся к литофильным элементам с большим содержанием ионов. Cu, Mo, W и Nb являются высокотемпературными металлогеническими элементами. Th и Bi относятся к той же категории. Au и Hg являются низкотемпературными элементами. Fe, Ni, Zr, Ti и Sr относятся к одному виду. Al, Si и P принадлежат к классу не образующихся основных минеральных элементов.

Факторный анализ.

Анализ основных компонентов (РСА) является важным методом снижения переменных, который широко применяется при обработке и анализе геохимических данных. Анализ основных компонентов был использован для получения 31 собственного значения. В этом процессе 11 основных компонентов были извлечены с использованием критерия собственного значения >1 (ПК с собственными значениями, превышающими единицу, могут считаться значимыми) (табл. 2).

Табл. 2.

Факторный анализ комбинаций элементов типа R.				
Factor	Factor Composition	Eigenvalues	% of Variance	Cum. of Variance
F1	0.902Te + 0.883Cs + 0.849Sn + 0.819Sb + 0.757Cd + 0.641Ba + 0.584Ag	4.560	14.711	14.711
F2	0.848Pb + 0.735Zn + 0.640As + 0.612Mn	2.457	7.924	22.635
F3	0.956Al + 0.953Si + 0.591P	2.396	7.730	30.365
F4	0.872K + 0.813Rb	2.038	6.575	36.940
F5	0.735Fe + 0.740Ti + (0.454Zr)	1.850	5.968	42.908
F6	0.748Cu + 0.635W	1.844	5.947	48.855
F7	0.871Ca + 0.810S	1.731	5.583	54.438
F8	0.846Bi + 0.794Th	1.564	5.046	59.484
F9	0.841Sr + (0.429Zr)	1.531	4.940	64.424
F10	0.870Nb + 0.722Mo	1.487	4.797	69.221
F11	0.695Au + 0.589Ni + (0.367Hg)	1.277	4.119	73.340

Результат факторного анализа согласуется с результатом кластерного анализа. Первый и второй факторы представляют средне- и низкотемпературные комбинации элементов; первый - важная сопутствующая комбинация элементов, а второй - элементы надрудного ореола рудообразующих элементов. Первый и второй факторы представляют важные элементы-индикаторы минерализации. Третий и пятый факторы представляют комбинацию основных элементов, а четвертый фактор - крупный ионный литофильный элемент. Третий, четвертый и пятый факторы отражают важную роль вмещающих пород в минерализации. Шестой фактор представляет Cu и W, выявляя очень тесную взаимосвязь между ними, показывая, что W тесно связан с основной минерализацией Cu. Сочетание Ca и S является основным компонентом

ангидрита, что позволяет предположить, что формирование особого ангидрита было тесно связано с оруденением.

Схема распределения элементов.

Микроэлементы соответствуют логарифмически нормальному распределению в геологических телах. Логарифм содержания всех элементов использовался для построения гистограммы частотного распределения (рис. 4).

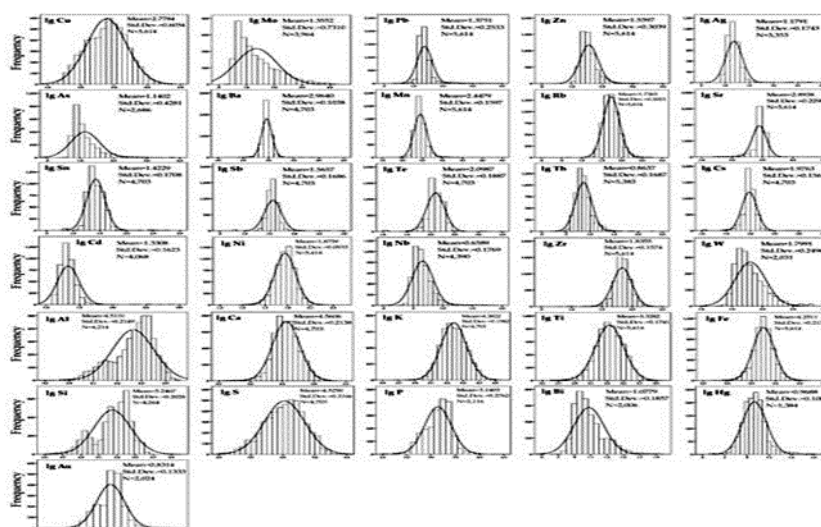


Рис. 4. Гистограммы частотного распределения содержания элементов на м-нии Кулонг.

Элементы Cu, Ni, Rb, Zr, Hg, Ca, K, Fe, Ti и S распределены нормально. Элементы Pb, Zn, Ag, Sn, Sb, Cd, Cs, Ba, Rb, Zr, Th, Te, Fe, Mn, Ti, Ca, K и P в основном соответствуют нормальному распределению. Распределение Mo, As, Nb, W и Bi имеет перекося влево. Sr, Au и Al смещены вправо. Si имеет бимодальное распределение.

В целом, структура распределения содержания элементов в исследуемых образцах в основном соответствует нормальному распределению, что является предпосылкой многомерного статистического анализа.

4. Обсуждение.

4.1. Характеристики первичного ореола.

Фоновое значение и нижний предел исключения.

Для металлогенических элементов Cu, Mo, Ag, Au и S пограничный сорт используется как аномальная внутренняя зона из-за высокого содержания элементов. Для элементов, тесно связанных с минерализацией (Pb, Zn, W, Bi, Hg, As, Sn, Sb, Cd, Cs, Co, Ba, Ni, Te и Mn), был принят метод зонирования аномалий элементов. Для основных неметаллогенических элементов (Fe, Ti, Ca, K, Mg, Al, Si и P) граница классификации аномалий была гибко разделена

в соответствии с фактическим тестированием. Классификация аномальных концентраций 28 элементов приведена в таблице 3.

Табл. 3.

Классификация аномальных концентраций элементов первичного ореола
в разведочной линии № 16, месторождение Кулонг.

Anomaly Classification	Cu	Mo	Ag	Au	S	Fe	Ti	Ca	K	Al	Si	Mg	P	Mn
(Sub) Inner Band	2000 *	240 *	50 **	8.8 **	6% ***	3%	0.29%	5%	3.1%	4.5%	27%	2%	0.125%	0.4%
Mesozone	1000	120	16	7.8	4.5%	2.1%	0.24%	4%	2.7%	4%	23%	1.5%	0.085%	0.1%
Outer Band (Anomaly Threshold)	500	50	10	6.8	2%	1.7%	0.21%	2.5%	2.2%	3.2%	16%	1%	0.065%	0.05%
Sub-outer Band (Background Value)	250	25	5	2	—	—	0.10%	—	—	—	—	—	0.050%	0.025%

Anomaly Classification	Pb	Zn	As	Sb	Sn	Cd	V	Sr	Ni	Co	W	Bi	Hg	Ba
(Sub) Inner Band	200	400	400	200	100	80	280	1000	200	200	120	40	20	5000
Mesozone	100	200	200	50	36	40	230	890	100	150	80	20	11	1250
Outer Band (Anomaly Threshold)	50	100	100	25	25	20	150	750	80	100	50	10	10	1000
Sub-outer Band (Background Value)	25	50	50	12	12	10	40	400	40	50	25	5	5	500

Trace element content in the table is given in ppm. * Industrial boundary grade of the element; ** The reference value of the inner content due to the high test value of the element; *** The associated boundary grade reference value of the element.

Особенности профиля Первичного ореола.

На основе данных из шести скважин разведочной линии месторождения № 16 в сочетании с аномальной зональностью каждого элемента в месторождении была составлена диаграмма аномальной зональности из 20 элементов (рис. 5).

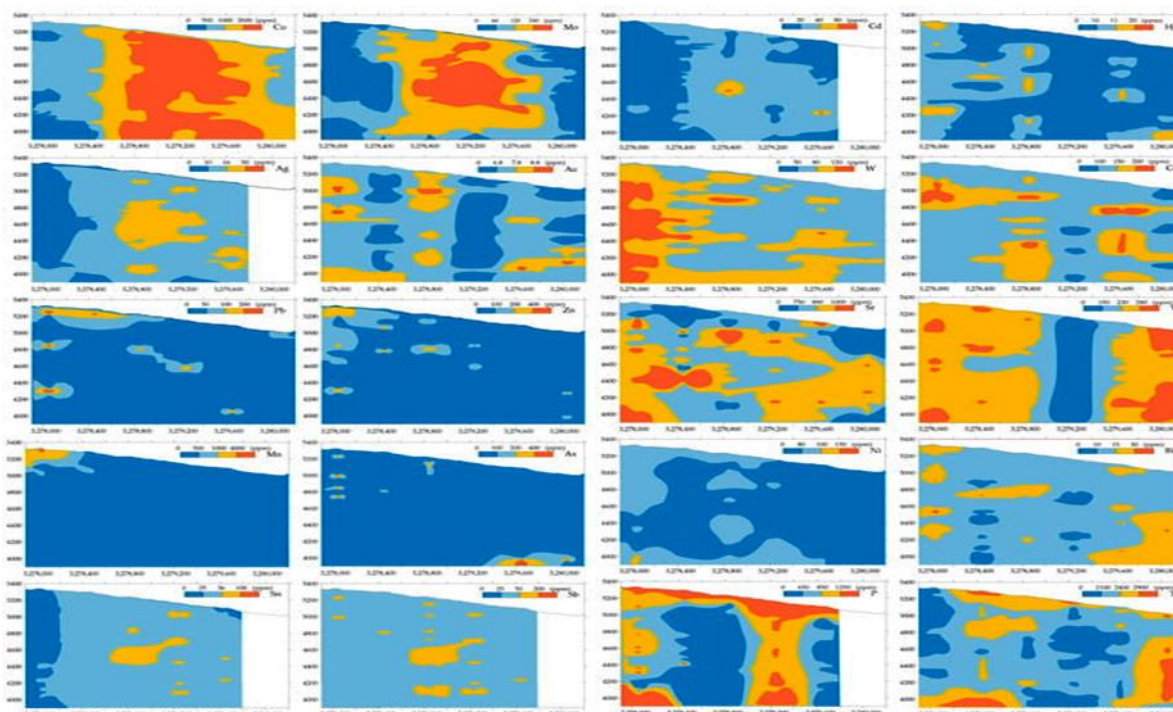


Рис. 5. Карта распределения элементов профиля первичного ореола.

Из рисунка 5 видно, что диапазон распределения аномалий во внутренних поясах Cu и Mo в основном хорошо согласуется с местоположениями рудных тел Cu и Mo (Mo имеет особенно

высокую степень согласованности). Cu имеет высокую степень сближения с оболочкой рудного тела от поверхности до средней части, но аномалия внутренней зоны также проявляется в “нерудном” положении на дне, контролируемом скважиной, что позволяет предположить наличие аномалии Cu в глубине. Аномалия Mo расположена ближе к глубине, чем аномалия Cu, что показывает, что Mo имеет более глубокую металлогеническую природу, чем Cu, что согласуется с типичными характеристиками верхних слоев меди и нижних слоев молибдена (рис. 6).

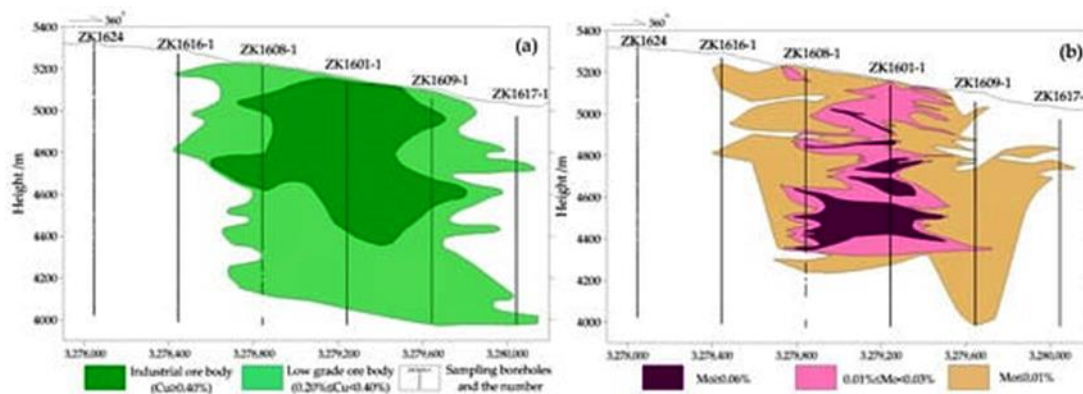


Рис. 6. Распределение: (a) Cu-рудного тела и (b) Mo-рудного тела.

Другие микроэлементы, Pb, Zn, W, Bi, Hg, As, Sn, Sb, Cd, Cs, Ba, Ni, Th и Te, а также основной элемент Mn показаны на рисунке 5. Pb, Zn и Mn в основном относятся к аномалиям II и III классов, и интенсивность аномалий в целом слабая. Диапазон распространения аномалий в основном тот же, что и в случае с относительно небольшой зональной областью, в основном распределенной на юго-западной поверхности рудного тела, со спорадическим распределением в других частях. Выявлено, что Pb, Zn и Mn расположены над металлогеническими элементами Cu и Mo, которые относятся к элементам надрудного ореола. Sn, Sb, Te, Cs и Cd не достигли аномалии I степени (в Cd обнаружилась лишь небольшая часть аномалии I степени), и весь разрез в основном достиг аномалии III степени или выше. Площадь вторичных аномалий невелика и в основном распределена в середине рудного тела. Распределение аномалий в основном соответствует распределению Ag, а аномалия II степени является полосчатой и хорошо перекрывается с Cu и Mo. Выявлено, что Ag, Sn, Sb, Te, Cs и Cd тесно связаны с минерализацией и относятся к элементам, ассоциированным с минерализацией. Весь разрез W и Hg находится выше аномалии III степени, а площадь аномалии II степени составляет половину всего разреза. Однако в Ni встречается только аномалия III степени, а аномалия III степени для Ni и аномалия II степени для W и Hg находятся в основном в одном и том же распределении, в основном расположенные на юге и в нижней части внешнего периметра

рудного тела. Аномалия W I степени встречается в скважине ZK1624 на большой площади, в то время как аномалия Hg I степени отсутствует.

Следовательно, W, Hg и Ni могут быть использованы в качестве элементов-индикаторов минерализации, и обнаружено, что интенсивность аномалий последовательно уменьшается.

В Вi встречаются только аномалии II и III классов; аномалия II класса в основном распределена на дне скважины ZK1617-1, в то время как другие участки появляются спорадически; то есть они в основном расположены ниже рудного тела. Ва имеет аномалию только III степени, а аномальная зона небольшая и слабая, в основном расположена в нижней части рудного тела.

Предварительно предполагается, что Вi и Ва относятся к элементам подрудного ореола.

Последовательность осевого зонирования первичного ореола.

Пробы из скважин, отобранные на разведочной линии № 16, находились на высоте 3952-5321 м. В соответствии с принципом наличия не менее трех поперечных сечений, вниз от поверхности было пять поперечных сечений: 5000 м и выше - поперечное сечение I, 4750-5000 м - поперечное сечение II, 4500-4750 м - поперечное сечение III, 4250-4500 м - поперечное сечение IV, и ниже 4250 м - поперечное сечение V. Было рассчитано среднее содержание каждого элемента в поперечных разрезах 16-й линии.

В соответствии с усовершенствованным методом расчета зонального индекса были получены его значения для всех элементов (табл. 4).

Табл. 4.

Индексы зональности первичных ореолов.

Cross-Sections	Cu	Mo	Pb	Zn	Au	Ag	As	Hg	Sn	Sb
I	0.077	0.035	<u>0.105</u>	<u>0.105</u>	0.000	0.000	<u>0.105</u>	0.072	0.000	0.034
II	0.071	0.000	0.031	0.060	<u>0.127</u>	0.035	0.080	<u>0.127</u>	0.016	0.000
III	<u>0.135</u>	0.078	0.018	0.018	0.077	<u>0.114</u>	0.029	0.006	0.109	0.053
IV	0.000	<u>0.107</u>	0.036	0.026	0.027	0.107	0.000	0.034	0.101	<u>0.107</u>
V	0.042	0.030	0.000	0.000	0.052	0.095	0.015	0.000	<u>0.110</u>	0.057

Cross-Sections	Mn	Ni	W	Bi	Co	Cd	Sr	V	Ti	P
I	<u>0.105</u>	<u>0.105</u>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	<u>0.105</u>	0.047	<u>0.105</u>
II	0.006	0.076	0.103	0.023	<u>0.127</u>	0.006	0.020	0.052	0.033	0.010
III	0.000	0.000	<u>0.135</u>	0.014	0.049	0.100	0.063	0.000	0.000	0.000
IV	0.002	0.003	0.094	0.013	0.026	<u>0.107</u>	<u>0.107</u>	0.006	0.085	0.011
V	0.007	0.007	0.108	<u>0.110</u>	0.030	<u>0.105</u>	<u>0.067</u>	0.050	<u>0.110</u>	0.006

Underlined numbers in the table are the maximum zoning indexes of elements.

На основании данных, приведенных в таблице 4, последовательность зонирования элементов может быть предварительно разделена. Вблизи поверхности поперечное сечение I представляет собой Pb, Zn, As, Mn и Ni; поперечное сечение II - Au, Hg и Co; поперечное сечение III - Cu и W; поперечное сечение IV - Mo, Ag, Sb, Te и Cs; и поперечное сечение V - Sn, Bi и Cd. Таким образом, полная последовательность вертикального зонирования участка 16-й линии к глубине (сверху вниз) составляет Mn-P-Pb-Ni-Zn-V-As-Hg-Co-Au-Cu-W-Ag-Mo-Sb-Sr-Cd-Sn-Ti-Bi.

С помощью интегративного анализа особенности зональной последовательности оси участка 16-й линии в Кулунге могут быть объяснены следующим образом:

(1) Элементы высокотемпературного подрудного ореола P, Ni и V были сосредоточены в верхней части рудного тела. Вторгшийся диоритовый порфирит в поздний период минерализации произошел из мантийной магмы, что привело к увеличению содержания Ni. Ni легко обогащается в результате выщелачивания, поэтому появление аномалии Ni в верхней части разреза может быть связано с литологией и поздними изменениями окружающей среды.

(2) Центральные части рудного тела представляют собой наложенные элементы околорудного ореола (Co, Au с W, Ag), которые могут быть образованы двумя близкими рудными телами.

(3) Элементы надрудного ореола Ag, Cd, Sb и Sr сосредоточены в средней и нижней частях рудного тела и перекрываются элементами подрудного ореола (Sn, Ti и Bi).

Таким образом, последовательность зонирования имеет очевидную “обратную” особенность, указывающую на то, что на глубине могут находиться скрытые рудные тела.

4.2. Геохимические параметры первичного ореола.

Коэффициент контрастности содержания элементов.

Из-за различий в содержаниях элементов на порядки величины для характеристики степени обогащения элементами использовалось безразмерное значение коэффициента контраста от среднего значения, исключая фоновое значение.

Содержание элементов в каждом участке отбора проб рассчитывается как среднее арифметическое содержания элементов во всех образцах на участке отбора проб. Осовое изменение коэффициента контрастности содержания элементов показано на рисунке 7.

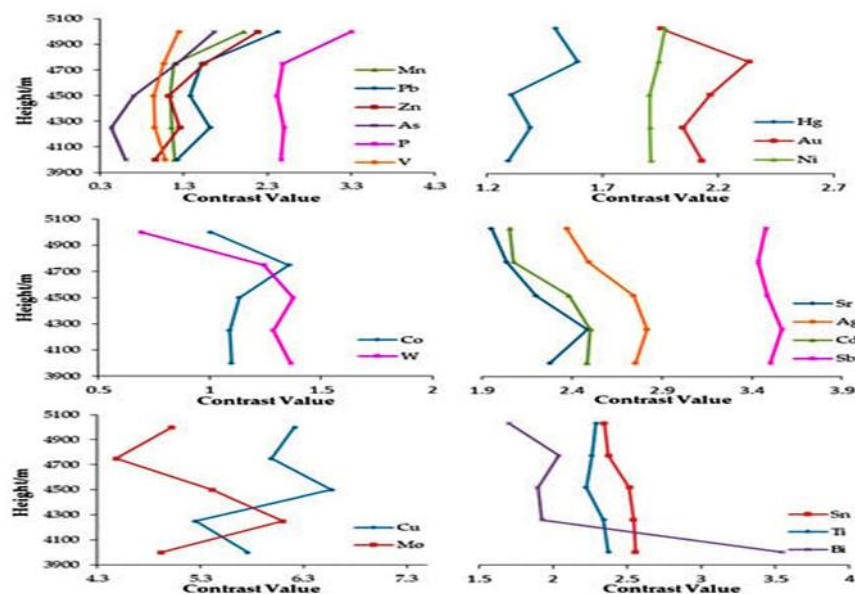


Рис. 7. Диаграмма осевого изменения коэффициентов контрастности элементов на месторождении Кулунг.

(1) Основные металлогенические элементы Cu и Mo имеют одинаковую тенденцию изменения. Общая тенденция снижения от поверхности показывает закономерность снижения → подъема → упадка. Разница заключается в том, что наибольшее содержание Cu наблюдается в разрезе на высоте 4500-4750 м, в то время как наибольшее значение Mo наблюдается на высоте 4250-4500 м. Центр концентрации Cu находится выше центра концентрации Mo, что согласуется с типичными характеристиками верхних слоев меди и нижних слоев молибдена в этом месторождении. Кроме того, Cu демонстрирует тенденцию к снижению в определенной степени на поверхности и тенденцию к росту в определенной степени в обнаженной хвостовой части рудного тела, что позволяет предположить, что в хвостовой верхней части разреза может находиться денудированное рудное тело, а в нижней части разреза может быть скрытое рудное тело Cu. Тенденции изменения связанных с ним Ag и Au в основном одинаковы, и общая тенденция меняется с восходящего на нисходящий. Подобно основным рудообразующим элементам, наибольшие значения Ag и Au наблюдаются в поперечном разрезе на высотах 4250-4500 м и 4750-5000 м соответственно, то есть ниже и выше центральной части рудного тела, и они являются основными элементами окolorудного ореола.

(2) Элементы надрудного ореола Pb, Zn, As, Mn и Hg показали ту же тенденцию изменения, с общей тенденцией к снижению от малой глубинности к большой. За исключением ртути, другие элементы показали определенную тенденцию к росту по глубине, что позволяет предположить, что на глубине может находиться скрытый фронт рудного тела.

(3) Тенденция изменения элементов подрудного ореола Sn, Ti и Bi в основном одинакова. От мелководья к глубине общая тенденция повышается, и наибольшее значение наблюдается в поперечном разрезе дна 4250 м. Общая скорость увеличения Sn и Ti невелика, в отличие от Bi. Наблюдается небольшая тенденция к снижению содержания Ti в процессе спуска от мелководной части к средней, что дополнительно указывает на то, что в верхней части разреза к хвосту может находиться денудированное рудное тело.

Индекс оценки геохимических параметров.

1. Закон осевого (вертикального) изменения

Чтобы устранить разницу в содержании элементов на порядок величины и усилить тенденцию изменения коэффициента контрастности, в качестве оценочного показателя использовалось значение контрастности каждого элемента. Были отобраны элементы надрудного ореола As, Mn, Hg, Sb и Sr, а также субрудные элементы Sn, Bi, Ti, P, V и Ni, и установлены девять индексов оценки геохимических параметров по формуле: $P = (\text{значение усталости от элементов надрудного ореола}) / (\text{значение усталости от элементов подрудного ореола})$, причем параметры представлены в виде $a, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3, d_1, d_2$, и e .

Были рассчитаны значения оценочных индексов (табл. 5) и составлена диаграмма осевых изменений (рис. 8).

Табл. 5.

Индексы оценки геохимических параметров.

IDX	Evaluation Index	I	II	III	IV	V
		>5000 m	4750–5000 m	4500–4750 m	4250–4500 m	<4250 m
1	$a = \text{As}/\text{Sn}$	0.356	0.256	0.139	0.086	0.118
2	$b_1 = (\text{As} \times \text{Mn})/(\text{Sn} \times \text{Bi})$	1.056	0.371	0.209	0.129	0.099
3	$b_2 = (\text{As} \times \text{Sb})/(\text{Sn} \times \text{V})$	0.999	0.828	0.518	0.321	0.386
4	$c_1 = (\text{As} \times \text{Sr} \times \text{Hg})/(\text{Sn} \times \text{Bi} \times \text{V})$	0.493	0.384	0.225	0.161	0.091
5	$c_2 = (\text{As} \times \text{Mn} \times \text{Sb})/(\text{Sn} \times \text{Ni} \times \text{V})$	1.100	0.541	0.332	0.198	0.242
6	$c_3 = (\text{As} \times \text{Sr} \times \text{Sb})/(\text{Sn} \times \text{P} \times \text{V})$	0.589	0.679	0.472	0.319	0.357
7	$d_1 = (\text{As} \times \text{Mn} \times \text{Sb} \times \text{Sr})/(\text{Sn} \times \text{V} \times \text{Ti} \times \text{Ni})$	1.090	0.567	0.383	0.258	0.289
8	$d_2 = (\text{As} \times \text{Hg} \times \text{Sr} \times \text{Sb})/(\text{Sn} \times \text{Bi} \times \text{P} \times \text{V})$	0.518	0.530	0.325	0.230	0.130
9	$e = (\text{As} \times \text{Mn} \times \text{Hg} \times \text{Sb} \times \text{Sr})/(\text{Sn} \times \text{V} \times \text{Bi} \times \text{Ni} \times \text{Ti})$	0.959	0.443	0.264	0.186	0.105

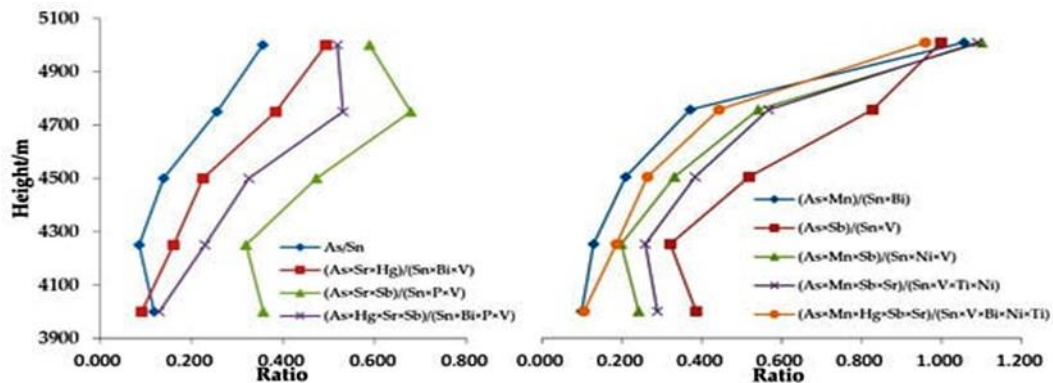


Рис. 8. Диаграмма осевого изменения оценочных индексов для геохимических параметров.

Как видно из рисунка 8, девять геохимических параметров демонстрируют тенденцию к снижению от мелководной части к глубокой, что отражает то, что выявленное в настоящее время основное рудное тело является относительно полностью минерализованным телом, а его хвостовая часть в основном обнажена. Разница заключается в том, что индексы c_3 и d_2 показывают тенденцию к росту от приповерхностного сечения I к сечению II, что позволяет предположить наличие денудированного рудного тела от вершины этого разреза до хвоста. В то же время индексы a , b_2 , c_2 , c_3 и d_1 также в определенной степени возросли между разрезами IV и V в глубине разреза, что позволяет предположить, что в нижней части может находиться скрытое рудное тело.

2. Закон горизонтального изменения

Характер распределения аномалий Ag и Mo и соотношение $w(\text{Ag})/w(\text{Mo})$ могут быть использованы для оценки верхней и нижней части рудного тела с пологим наклоном, чтобы определить возможное направление потока минерализующего флюида. Были установлены два индекса Ag/Cu и Ag/Mo на основе коэффициента контрастности элементов, а также рассчитаны средние значения Cu, Mo и Ag в скважинах (рис. 9).

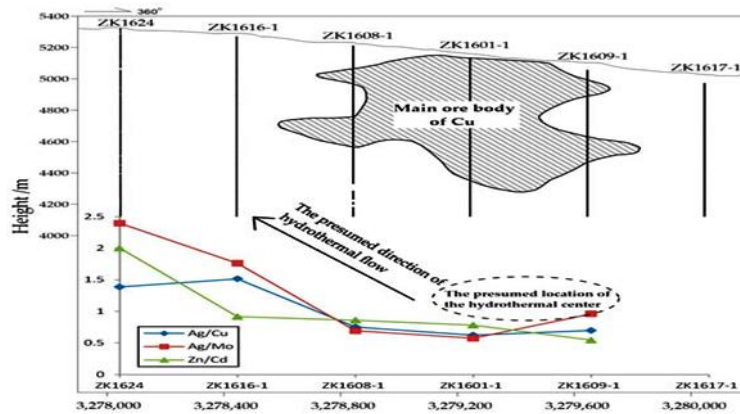


Рис. 9. Продольное распределение рудного тела Кулонг, изменения в соотношении Ag/Cu и Ag/Mo и направлении потока минерального флюида.

Горизонтальная диаграмма тенденций показывает, что общая тенденция изменения индексов Ag/Cu и Ag/Mo в основном одинакова. В горизонтальном направлении наблюдается тенденция к снижению с юга на север, и низкое значение имеет местоположение рудного тела. Расположение скважины ZK1601-1 является наименьшим, что указывает на то, что минеральный флюид течет к югу от ZK1601-1. Таким образом, можно сделать вывод, что ZK1601-1 является местоположением гидротермального центра в разрезе 16-й линии.

4.3. Модель параметров денудации рудного тела.

В соответствии с последовательностью осевого зонирования элементов в разрезе 16-й линии, As, Mn, Au и Hg были выбраны в качестве надрудной группы элементов, а Mo, Sn, Ti и W - в качестве подрудной группы элементов. В качестве зависимой переменной была выбрана относительная высота ΔH известного рудного тела. Поскольку коэффициент контрастности, имел относительно небольшой мультипликативный коэффициент, индекс оценки денудации был умножен на 1000 и взят логарифм. Используя оценочный параметр $K = \ln(\eta \times 1000)$ в качестве независимой переменной, было составлено унитарное линейное уравнение регрессии между зависимой переменной ΔH и независимой переменной K : $\Delta H = a + b \times K$, где $\Delta H = (H - H_0)/L$, H - центральное возвышение разреза рудного тела, H_0 - возвышение центрального положения рудного тела, а L - длина вертикального расширения рудного тела.

Согласно данным разведки м-ния Кулонг, высота пространственного распределения рудных тел составляет от 4350 до 5100 м. Таким образом, центральное положение рудного тела на участке 16-й линии составляет 4725 м, а вертикальная протяженность - около 750 м. Диапазоны выбранного участка сверху донизу составляют 4750-5000 м, 4500-4750 м и 4250-4500 м, а центральная высота составляет 4875 м, 4625 м и 4375 м соответственно. В соответствии с коэффициентами контрастности элементов в каждом разрезе были установлены два параметра первого порядка (A_1 и A_2), четыре параметра второго порядка (B_1, B_2, B_3, B_4), три

параметра третьего порядка (C_1 , C_2 , C_3) и один параметр четвертого порядка (D). Были рассчитаны параметры оценки каждого показателя в каждом разрезе (табл. 6), а также составлена диаграмма тренда относительного повышения параметров денудации и рудного тела (рис. 10).

Табл. 6.

Индексы параметров эрозии.

Degree	Evaluation Index Parameter $K = \ln(\eta \times 1000)$		Central Location of Orebody Cross-Section			Linear Fitting Equation (ΔH)	Goodness of Fit R^2
	Indicator Symbol	η	4875 m	4625 m	4375 m		
1	A ₁	As/Sn	5.544	4.938	4.453	$y = 0.6083x - 3.1615$	0.9959
	A ₂	As/Mo	4.906	4.170	3.578	$y = 0.5000x - 2.2424$	0.9961
2	B ₁	$(As \times Mn)/(Sn \times Ti)$	5.119	4.491	3.970	$y = 0.5789x - 2.7538$	0.9971
	B ₂	$(As \times Mn)/(Ti \times W)$	5.763	5.096	4.652	$y = 0.5924x - 3.1964$	0.9867
	B ₃	$(As \times Hg)/(Mo \times Ti)$	3.861	2.945	2.360	$y = 0.4371x - 1.4690$	0.9841
	B ₄	$(As \times Mn)/(Mo \times Sn)$	4.433	3.600	3.013	$y = 0.4647x - 1.8443$	0.9901
3	C ₁	$(As \times Mn \times Hg)/(Mo \times Sn \times Ti)$	3.388	2.375	1.795	$y = 0.4084x - 1.1622$	0.9760
	C ₂	$(Mn \times Au \times As)/(Ti \times Sn \times W)$	5.459	4.659	4.148	$y = 0.3751x - 1.3337$	0.9562
	C ₃	$(As \times Au \times Hg)/(Mo \times Sn \times W)$	4.154	2.990	2.455	$y = 0.5004x - 2.5127$	0.9841
4	D	$(As \times Mn \times Au \times Hg)/(Mo \times Ti \times W \times Sn)$	3.729	2.543	1.972	$y = 0.3647x - 1.1356$	0.9608

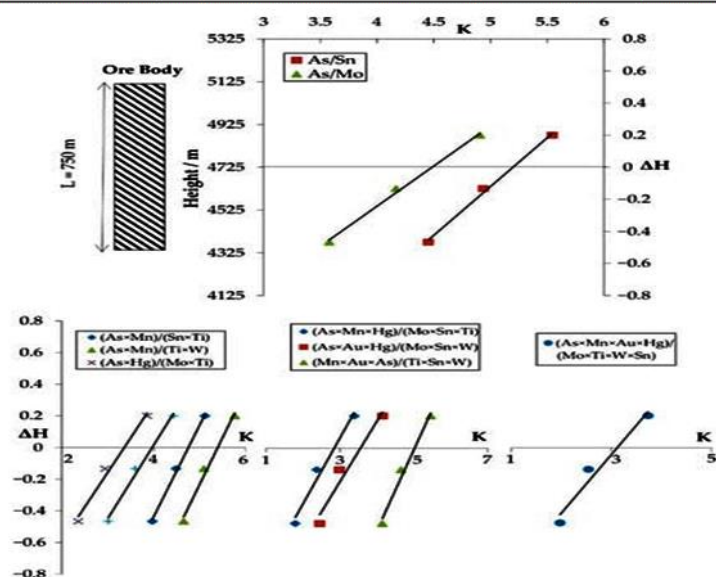


Рис. 10. Диаграмма тенденции изменения регрессии параметров эрозии.

Как видно, параметр K индекса оценки денудации рудного тела регулярно уменьшается с уменьшением высоты рудного тела. Линейная зависимость между K и ΔH на диаграмме тренда хорошая. Степень соответствия (R^2) линейного уравнения соответствия между относительной высотой (ΔH) рудного тела и индексным параметром (K) оба превышают 0,956, и достоверность высока, что указывает на хорошее линейное соответствие между индексными параметрами оценки денудации и высотой разреза. О местоположении участка рудного тела можно судить по параметрам индекса оценки денудации.

10 параметров индекса оценки поперечных сечений выше 5000 м и ниже 4250 м были подставлены в подогнанное уравнение линейной регрессии, чтобы получить значение ΔH для этих двух поперечных сечений (табл. 7).

Результаты проверки параметров эрозии.

Elevation of Cross-Section	ΔH										Average Value (ΔH)	Predicted Position
	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	C ₁	C ₂	C ₃	D		
5000–5250 m	0.412	0.314	0.703	1.064	0.277	0.565	0.499	0.436	0.849	0.620	0.574	Head of ore body
4000–4250 m	–0.258	–0.184	–0.261	–0.273	–0.238	–0.182	–0.233	–0.246	–0.279	–0.248	–0.240	Mid-tail of ore body

Из анализа полученных параметров денудации был сделан вывод, что самая верхняя часть профиля должна принадлежать головной части рудного тела, которая находится в состоянии слабой денудации, а нижняя часть разреза относится к средней хвостовой части рудного тела, которая не достигает хвостовой части. Был сделан вывод, что дно разреза, обнажившегося в результате глубинной инженерии, должно в определенной степени простираться вниз.

4.4. Идеальная наложенная модель первичного ореола.

На основе приведенного выше анализа исходных характеристик аномального распределения элементов на участке 16-й буровой линии и характеристик изменения соответствующих индексов был проведен следующий анализ:

1. В верхней части последовательности зонирования первичного ореола присутствуют в основном надрудные и некоторые субрудные элементы ореола. В сочетании с правилом изменения геологических параметров в мелководной части и значениями параметров денудации делается вывод, что приповерхностная часть рудного тела относится к головной части рудного тела, но она подверглась умеренной денудации.

2. Элементы надрудных, околорудных и субрудных ореолов появляются последовательно в верхней, средней и нижней частях зональной последовательности. В сочетании с общей тенденцией к снижению значений индекса геологических параметров и индекса денудационных параметров делается вывод о том, что здесь имеется относительно цельное рудное тело от приповерхностной зоны до средней и нижней части.

3. В соответствии с последовательностью осевого зонирования элементов, последовательность зонирования имеет очевидную “обратную” особенность, то есть элементы надрудного и околорудного ореолов в определенной степени накладываются друг на друга в средней и нижней части последовательности. В сочетании с другими оценочными показателями делается вывод о том, что в средней и нижней части рудного тела имеется средний хвост, а глубинная часть должна простираться на определенную величину.

С помощью приведенного выше всестороннего анализа можно предварительно установить идеальную модель суперпозиции первичного ореола разведочной линии № 16 (рис. 11).

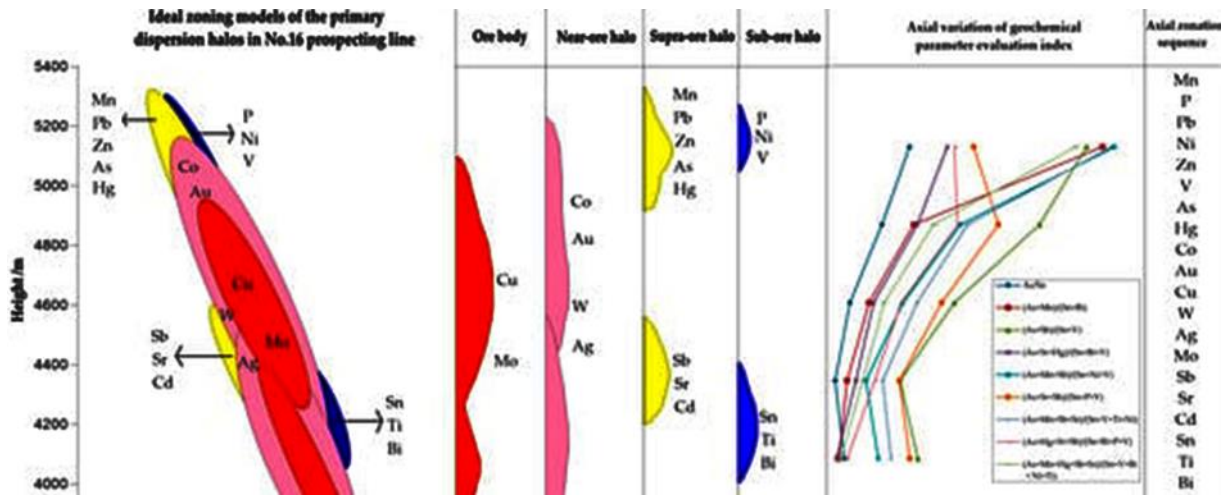


Рис. 11. Идеальные модели зонирования первичных рассеивающих ореолов месторождения Кулонг.

5. Выводы.

1. В качестве объектов исследования был выбран 31 элемент: Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Au, W, Bi, Hg, As, Sn, Sb, Cd, Cs, Ba, Nb, Ni, Rb, Sr, Zr, Th, Te, Fe, Mn, Ti, Ca, K, Al, Si, P, и S. Результаты корреляционного анализа показывают, что общая корреляция 31 элемента хорошая: Cu, Mo, Pb, Zn, Ag и S имеют значительную положительную корреляцию, а Cu и Mo являются основными рудообразующими элементами. Совокупный вклад в дисперсию факторной комбинации 11 основных факторов, извлеченных из факторного анализа, составляет 73,3%.

2. Геохимические характеристики первичных ореолов показывают, что Cu и Mo являются рудообразующими элементами; Co, Au, Ag и W являются элементами окolorудного ореола; Pb, Zn, Mn и As являются элементами надрудного ореола; и Sn и Bi являются элементами подрудного ореола. Последовательность вертикального зонирования элементов первичного ореола – Mn–P–Pb–Ni–Zn–V–As–Hg–Co–Au–Cu–W–Ag–Mo–Sb–Sr–Cd–Sn–Ti–Bi от мелководья к глубине. Последовательность зонирования имеет очевидную “обратную” особенность, указывающую на то, что на глубине могут находиться скрытые рудные тела.

3. Ряд значений индекса оценки геохимических параметров P , рассчитанный как $P = (\text{кратность контраста элементов надрудного ореола}) / (\text{кратность контраста элементов подрудного ореола})$, основанный на коэффициенте контраста содержания элементов, показывает тенденцию от мелководья к глубине в осевом направлении, предполагая, что в нижней части может находиться скрытое рудное тело. Значения оценочного индекса, установленные в горизонтальном направлении, демонстрируют тенденцию к снижению с юга на север, указывая на то, что относительный гидротермальный центр разреза расположен в средней части на севере впадины.

4. Модель параметров денудации показывает, что верхняя часть разведочной линии № 16 является головной частью рудного тела, которое подверглось лишь незначительной неглубокой денудации. Дно, контролируемое бурением, является средним хвостом рудного тела, и в глубине наблюдается определенная степень расширения. Идеальная модель суперпозиции первичного ореола в определенной степени отражает тенденцию рудного тела. Оно в целом наклонено к северу, и рудный флюид перетекает из северной глубоководной части в южную мелкоководную часть, а северная глубоководная часть имеет тенденцию к понижению, которая потенциально может быть использована в качестве района глубинных поисков руды.

IV. НОВЫЙ АЛГОРИТМ АНИЗОТРОПНОЙ СИНГУЛЯРНОСТИ ПРИ ПОИСКАХ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ (район Дуолонг, Тибет, Китай) [2].

1. Введение

Благодаря совершенствованию моделей и алгоритмов слияния произошло постепенное улучшение понимания сложности и точности минерализации, сохраненной в этих математических структурах. Анизотропные закономерности будут иметь большое значение для инверсии знаний, связанных с минерализацией, например, миграцией флюидов и структурой, контролирующей руду. Другими словами, аналитические результаты фрактальных/мультифрактальных моделей направлены не только на обнаружение областей скопления рудного материала, но и на выражение анизотропной природы геоаналитических аномалий.

Основное внимание при обсуждении нового алгоритма анизотропной сингулярности при поисках скрытого оруденения (LSA) уделяется аналитическому окну, которое было интегрировано с буферным анализом и определено как серия квадратных окон, ориентированных на сегменты. Для исследования анизотропных геохимических аномалий был предложен алгоритм сингулярности на основе которого были получены новые свойства разломов из геохимических изменений вокруг систем разломов. Направления аналитических окон были использованы в качестве практического представления анизотропии, способствующего интерпретации структуры. Кроме того, исходное аналитическое квадратное окно также было обновлено в соответствии с intergrade с алгоритмом U statistics. Результаты, полученные с помощью нового LSA, не только хорошо характеризуют пространственные вариации геоаномалий, но и обеспечивают закономерности, указывающие на анизотропию. В этом исследовании предлагается новый алгоритм обнаружения анизотропных особенностей, который обеспечит более полное представление об анизотропных геоаномалиях.

2. Территория исследования и наборы данных

Медно–золотой рудный район Дуолонг, расположен в районе Али северо–западного Тибета, Китай, в западной части мезозойской тектоно-магматической дуги. (рис. 1).

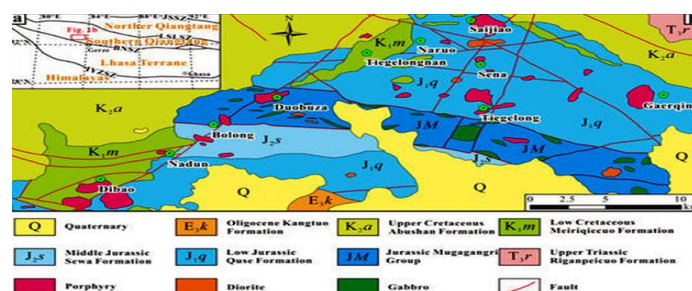


Рис. 1. (а) тектонический каркас Тибетского плато; (б) геологическая схема рудного района Дуолонг.

В рудном районе Дуолонг выявлено несколько крупных и сверхкрупных порфировых и эпитермальных Cu-Au м-ний, связанных с мезозойской ТМА. Совокупные доказанные запасы меди в этом районе превышают 20 млн т.

Разломная тектоника в пределах района хорошо развита и обладает характеристиками нескольких стадий, проявляясь в трех группах, ориентированных NE, NW и EW. Магматическая активность в районе характеризуется многоступенчатыми интрузиями порфиров, габбро и диоритов. Вулканические базальтово-андезитовые породы перекрывают юрские слои, что имеет важное значение для сохранения минерализованных зон.

Геохимические данные, собранные при отборе донных осадков, состоят из 3358 проб с плотностью отбора 4 пробы на км². Были измерены значения концентрации 15 микроэлементов (Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Mn, Ag, Sn, W, Mo, As, Sb, Bi, Hg, Au), в этом числе концентрации двух основных рудных элементов Cu и Au, чтобы охарактеризовать аномалии минерализации и продемонстрировать применение предложенного метода. В таблице 1 представлена подборка основных статистических параметров.

Табл. 1.

Геохимические данные Duolong.

	Max	Min	Mean	Standard Deviation	CV	Median	Skewness
Cu (in ppm)	854.00	6.20	38.51	51.99	1.35	26.84	8.67
Au (in ppb)	1058.50	0.40	4.76	25.00	5.25	2.15	29.58

Результаты показывают, что распределение элементов Cu и Au положительно искажено, о чем свидетельствуют их медианные значения, меньшие соответствующих средних значений. Необработанные геохимические данные с асимметрией, превышающей ноль, указывают на ненормальное распределение. Кроме того, большие коэффициенты вариации (CV) предполагают значительную тектоническую активность в исследуемом районе. Чтобы исследовать характеристики пространственного распределения элементов Cu и Au, были отобраны четыре образца (один на 0,25 км²). Геохимические данные первоначально анализировались с пространственным разрешением 0,5 км с использованием метода обратного взвешивания расстояний, чтобы гарантировать наличие только одного образца на площади 0,5×0,5 км.

3. Методы.

3.1. Фрактальные/мультифрактальные модели.

Степенная зависимость, которая следует масштабной инвариантности и обобщенному самоподобию, может быть использована для исследования сложных процессов, о чем

свидетельствуют конечные продукты сингулярных процессов. Предполагая, что существует объект или структура неправильной формы, фрактальная размерность является параметром, эффективным для характеристики фрактальной структуры и атрибутивных свойств объекта. В целом, его можно оценить с помощью метода подсчета квадратов (ВС). В ходе оценки сначала определяется серия окон с разными масштабами (ε_i). Для каждой серии окон с масштабами ε_i количество окон, полностью закрывающих объект, может быть определено как $N(\varepsilon_i)$. Степенная зависимость между ε_i и $N(\varepsilon_i)$ может быть выражена как:

$$N(\varepsilon_i) \propto c\varepsilon_i^{-D} \quad (1)$$

где $\propto$ представляет пропорциональность, c - константа, а D - фрактальная размерность, оцененная методом подсчета квадратов.

Кривая Коха является прототипом фрактальной кривой. Он разделен на квадраты, как показано на рисунке 2. Используя метод ВС (табл. 2), фрактальное измерение может быть вычислено как $D = 1,2$. Объекты с неправильной и сложной геометрией обычно демонстрируют нецелочисленное (фрактальное) измерение. По сути, это означает, что сложность объекта напрямую коррелирует с его фрактальной размерностью. Проще говоря, чем более сложным кажется объект, тем выше будет его фрактальная размерность.

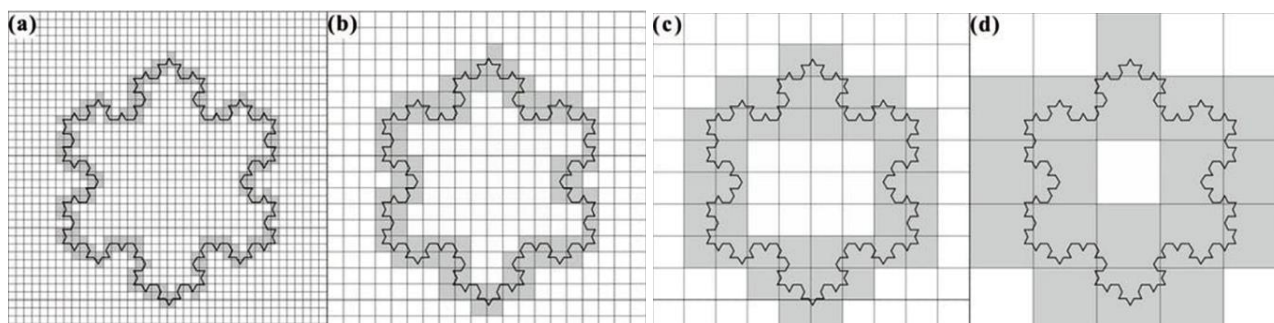


Рис. 2. Выборки методом ВС для вычисления фрактальной размерности кривой Коха.
(a) размер ячейки - 1; (b) -2; (c) -4; (d) -8.

Размер и номера ячеек кривой Коха.

Табл. 2.

Box Size ε_i	1	2	4	8
Box Count $N(\varepsilon_i)$	221	93	42	18

Как естественное расширение меры самоподобия, определяемой в пространстве фрактальными геометрическими точками, мультифракталы можно рассматривать как фракталы, в которых последовательные фрактальные размерные спектры переплетены в пространстве. Мультифрактальные спектры часто используются для характеристики мультифракталов, аналогично использованию фрактальной размерности для характеристики фракталов. Различные наборы самоподобных фракталов, определенных по одному и тому же сложному шаблону, могут быть взаимосвязаны с помощью мультифрактальной теории.

Без потери общности моделирование выполняется в двух измерениях в качестве примера. Предположим, что в двумерной плоскости i -я ячейка минерализующего элемента с длиной кромки ε имеет меру $\mu_i(\varepsilon)$, а мера $\mu_i(\varepsilon)$ представляет собой общее содержание этого элемента в ячейке. Таким образом, общее содержание локального элемента может быть представлено мерой в i -м квадрате размера. Мера сетки в пространстве длиной ε равна $\mu_i(\varepsilon)$. Пусть ε – длина i -го блока, содержащего минерализующий элемент с мерой $\mu_i(\varepsilon)$, которая представляет общее содержание этого элемента в блоке. Следовательно, показатель в каждом i -м квадрате размером ε может представлять общее содержание локального элемента. Мера пространственной сетки с длиной ε также равна $\mu_i(\varepsilon)$, и степенное соотношение может быть выражено следующим образом.

$$\mu_i(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\alpha_i} \quad (2)$$

где α_i называется грубым показателем Холдера (также известным как индекс сингулярности).

После определения количества ячеек с одинаковыми значениями на фрактале как $N_\alpha(\varepsilon)$, можно наблюдать степенную зависимость относительно заданного значения α .

$$N_\alpha(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-f(\alpha)} \quad (3)$$

Функция $f(\alpha)$ называется функцией мультифрактальных спектров, которая соответствует размерности прямоугольника с тем же α во фракталах. Различные подмножества значений α имеют разные фрактальные измерения, представленные $f(\alpha)$.

С момента введения одномерной спектральной функции Халси и др. был разработан ряд методов для вычисления спектральной функции, например, методы функции разбиения, фрактальной интерполяции, мультифрактального анализа трендовых флуктуаций, разложения по эмпирическим модам и вейвлет-преобразования максимумов модуля. Среди этих достижений часто обсуждается метод момент. Чтобы прояснить характер распределения $f(\alpha)$, сначала необходимо построить функцию распределения $\chi_q(\varepsilon)$.

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i^q(\varepsilon) \quad (4)$$

где q - произвольное вещественное число, представляющее $\mu_i(\varepsilon)$ статистический момент порядка.

Отрицательная q служит усилителем для небольших блоков содержимого, в то время как положительная q подчеркивает значимость больших блоков содержимого. Если мера $\mu_i(\varepsilon)$ проявляет мультифрактальные свойства, то $\chi_q(\varepsilon)$ и ε соответствуют степенному соотношению для всех значений q .

$$\chi_q(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\tau(q)} \quad (5)$$

где $\tau(q)$ обозначает массовый показатель, выпуклую функцию относительно q и достигает максимальной кривизны при $q = 1$.

Он может выявить, присутствует мультифрактальность или нет. Кроме того, взаимосвязь между индексом сингулярности α и мультифрактальными спектрами $f(\alpha)$ может быть получена с помощью преобразования Лежандра в виде

$$\alpha(q) = d\tau(q)/d(q) \quad (6)$$

$$f(\alpha) = \alpha(q)q - \tau(q) \quad (7)$$

Выпуклая функция, напоминающая параболу, будет показана на графике путем построения α и $f(\alpha)$, называемых мультифрактальными спектрами мер. Судя по спектрам, обычно существует четыре параметра для интерпретации геологических знаний. Первым параметром является значение показателя Гельдера $\alpha(q)$ при $q = 0$, где $f(\alpha)$ достигает своего максимума, обозначаемого как α_0 . Вторым является индекс асимметрии, определяемый как $R = \alpha(0) - \alpha_{min} / \alpha_{max} - \alpha(0)$. $R > 1$ указывает на мультифрактальные спектры с левым смещением, что подразумевает локальное обогащение рудообразующих материалов. И наоборот, $R < 1$ представляет собой смещенный вправо спектр и соответствует локальному истощению рудообразующих материалов. Случай $R = 1$ указывает на полностью симметричный мультифрактальный спектр. Третье – ширина спектров, обозначаемая как $\Delta\alpha = \alpha_{max} - \alpha_{min}$. Чем шире кривая $f(\alpha)$, тем более неоднородно распределены измерения в пространстве, и наоборот, на что указывает более высокое значение $\Delta\alpha$. Четвертый параметр – это высота мультифрактальных спектров, которая обозначается как $\Delta f = f(\alpha_{min}) - f(\alpha_{max})$. Этот параметр в основном отражает разницу в пропорции между максимальным и минимальным подмножествами измерений в различных масштабах (ε). Когда $\Delta f > 0$, мультифрактальные спектры имеют перекося влево. Это означает, что при изменении масштаба скорость изменения числа подмножеств, соответствующих минимальному индексу сингулярности α_{min} , медленнее, чем скорость изменения максимального индекса сингулярности α_{max} . Он указывает на область обогащения в малом масштабе. Когда $\Delta f < 0$, мультифрактальные спектры приобретают форму. Это указывает на то, что скорость изменения числа подмножеств, соответствующих минимальной сингулярности α_{min} выше, чем скорость изменения максимального индекса сингулярности α_{max} , по мере увеличения масштаба. Это приводит к относительно большим площадям обогащения. При $\Delta f \approx 0$ мультифрактальные спектры приобретают симметричную форму. По мере изменения масштаба количество подмножеств, соответствующих как минимальному индексу сингулярности α_{min} , так и максимальному индексу сингулярности α_{max} , изменяется с одинаковой скоростью, указывая на региональное обогащение и/или дефицит в том же масштабе.

3.2. Анализ локальных сингулярностей.

LSA представляет собой новый подход к анализу сложных систем минерализации, которые проявляют необычное поведение в определенных точках или районах. Выбирая двумерные геохимические данные в качестве примера, ключевые параметры и индекс сингулярности в локальном анализе сингулярности могут быть получены из степенной зависимости между общим количеством рудного вещества $\mu(A)$ и его концентрацией $c(A)$.

$$\mu(A) = c(A)^{\alpha/2} \quad (8)$$

$$C(A) = c(A)^{\alpha/2-1} \quad (9)$$

где A представляет 2D, а c является константой. A - индекс сингулярности, значение которого может быть использовано для характеристики нерегулярного и сложного геохимического распределения, связанного с нелинейной минерализацией.

При $\alpha=2$, представляющем линейное распределение, концентрации элементов равномерны. Значение $\alpha < 2$ указывает на постепенное снижение концентрации элементов от центра к его окрестностям, в то время как положительная сингулярность (α) указывает на обогащение элементами. И наоборот, когда $\alpha > 2$, происходит постепенное увеличение концентрации элементов от центра к периферии, и эта отрицательная сингулярность подразумевает истощение элементов.

На практике наиболее часто используемым подходом для оценки индекса сингулярности является алгоритм на основе квадратного окна (рис. 3).

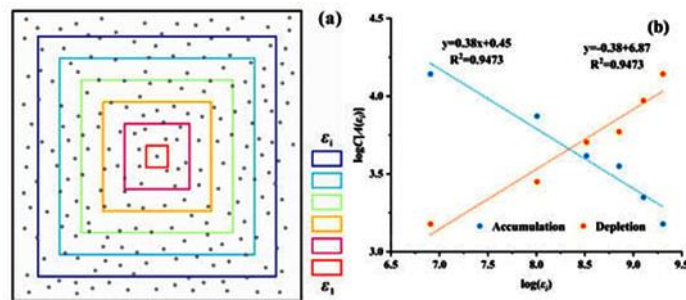


Рис. 3. Схема метода картирования сингулярностей на основе квадратных окон.

(а) набор квадратных окон различных размеров (ε_i) в месте отбора проб;

(б) логарифмический график размеров окон (ε_i) и концентраций $C[A(\varepsilon_i)]$ для оценки индекса сингулярности.

Первоначально серия квадратных окон с различными размерами ($A_i = \varepsilon_i^2$) определяется как сосредоточенная в определенном месте. Нанося размеры окон ε_i и соответствующие им концентрации $C[A(\varepsilon_i)]$ на логарифмический график, можно оценить индекс сингулярности на основе наклона ($k = \alpha - 2$) линейной зависимости между ε_i и $C[A(\varepsilon_i)]$. Реализуя эти шаги по всей территории, можно очертить пространственное распределение индексов сингулярности и охарактеризовать качественные и количественные вариации в геохимических распределениях.

3.3. Алгоритм анизотропной сингулярности.

Аналитическое окно имеет квадратную форму, которая проявляет скорее изотропные свойства, чем анизотропные. Хотя оно остается эффективным при выявлении целевых зон с накоплением рудного материала, оно может не подходить для более тонких исследований. Поэтому в настоящем исследовании представлен новый алгоритм оценки индекса анизотропной сингулярности, основанный на практическом применении в минеральном районе Дуолонг, Тибет, Китай (рис. 4).

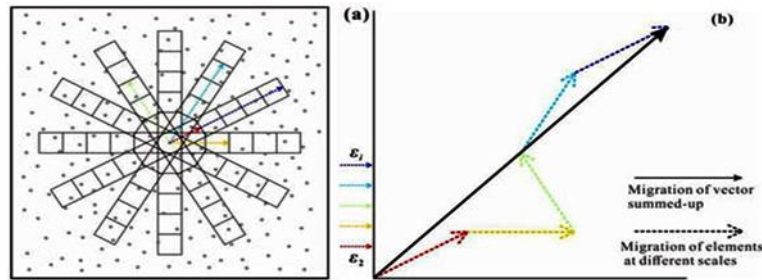


Рис. 4. Алгоритм оценки анизотропной сингулярности:
(a) процесс оценки; (b) суммированная миграция вектора разного масштаба.

Общий процесс оценки включает следующее:

(1) Выбор репрезентативной выборки в качестве центроида и обозначение начального прямоугольного окна как A_1 ($A = \varepsilon_1 \times 1_{\varepsilon}$, любой длины в зависимости от масштабов анализируемых данных). Впоследствии генерация последовательности прямоугольных окон, отходящих к северу от исходного окна, с размерами $\varepsilon_1 \times i$ (где ε_i может быть определено сценариями практического применения);

(2) В каждом масштабе ε_i сначала ориентировка прямоугольного окна в северном направлении (0°), а затем поворот азимута с определенным интервалом. Интервал (0° - 360°) также предопределен в зависимости от масштабов анализируемых данных. Средние концентрации элементов рассчитываются в пределах каждого окна направления $C[A(\varepsilon_i)]$.

(3) Поскольку геохимическое поведение (накопление или истощение) не может быть предопределено до анализа, выбираются как максимальные, так и минимальные концентрации элементов в пределах их соответствующего окна вращения, а также азимуты в каждом масштабе. Это приводит к двум (т.е. максимальному и минимальному) наборам определенных концентраций элементов.

(4) В каждом масштабе на график наносятся концентрации $C[A(\varepsilon_i)]$ и размеры окон ε_i , соответствующие наборам максимумов и минимумов на логарифмическом графике соответственно. Наклоны k на логарифмическом графике могут быть оценены методом наименьших квадратов. Среди склонов всех масштабов выбирается тот, который имеет наибольшее абсолютное значение для оценки индекса анизотропной сингулярности, $k = \alpha - 1$.

(5) В отличие от алгоритма оценки изотропной сингулярности, новый метод представляет азимуты выбранных окон в каждом масштабе в виде векторов со стрелками (от низкой концентрации к высокой), эффективно иллюстрируя многомасштабные тенденции миграции элементов. Кроме того, эти векторы в каждом масштабе можно суммировать, чтобы всесторонне описать анизотропное геохимическое поведение геохимических распределений.

(6) Аналогично алгоритму на основе квадратного окна, вышеупомянутые шаги выполняются для каждого местоположения во всей исследуемой области, тем самым генерируя пространственное распределение индекса сингулярности по пространству.

4. Тематическое исследование в рудном районе Дуолонг.

4.1. Геохимическое распределение рудных элементов.

Геохимические данные по Cu и Au первоначально интерпретировались как карты сетки с использованием метода взвешивания по обратному расстоянию (IDW). Полученные геохимические распределения эффективно продемонстрировали, что большинство геохимических аномалий согласуются с обнаруженными месторождениями, такими как Дуобуза, Наруо и др. Однако все еще существуют некоторые месторождения, расположенные в районах со слабыми аномалиями. Просмотрев карты распределения Cu и Au, можно сделать несколько наблюдений (рис. 5).

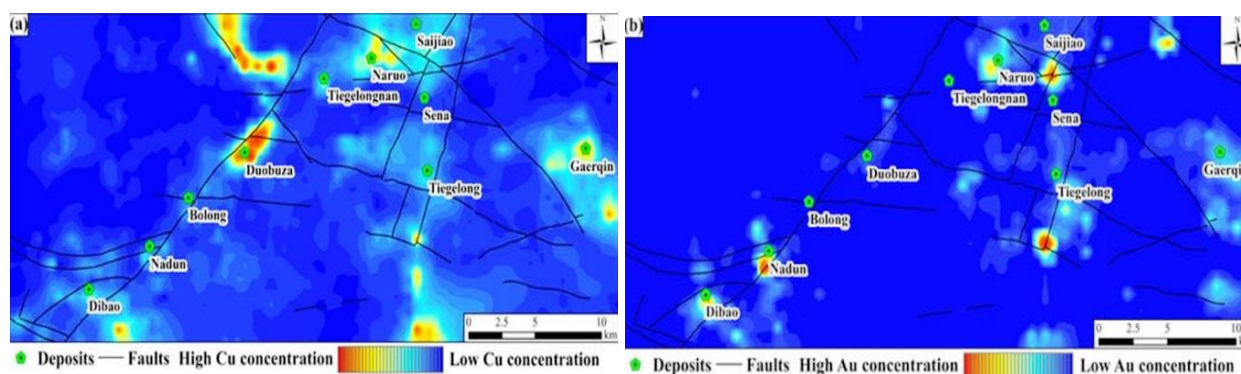


Рис. 5. Геохимические распределения рудных элементов с помощью IDW: (a) Cu и (b) Au.

Во-первых, аномалии Cu расположены примерно вдоль северо-восточного тренда и распределены в непосредственной близости от разломов северо-восточного тренда в пределах области минерализации. Это согласуется с обнажением порфировых тел в районе, указывая на то, что тектоника трещиноватости играет важную роль в локализации минерализации. Распределение аномалий Au является спорадическим, что указывает на слабый общий потенциал минерализации по сравнению с Cu.

4.2. Мультифрактальный анализ.

Анализ мультифракталов обычно включает выбор диапазона моментов q , центрированных на нуле, которые служат весовыми коэффициентами для усиления отчетливого вклада сингулярностей. В этом исследовании диапазон моментов определен от -10 до 10. Основываясь на вышеупомянутом введении, можно получить мультифрактальные спектры для Cu и Au в исследуемом районе (рис. 6).

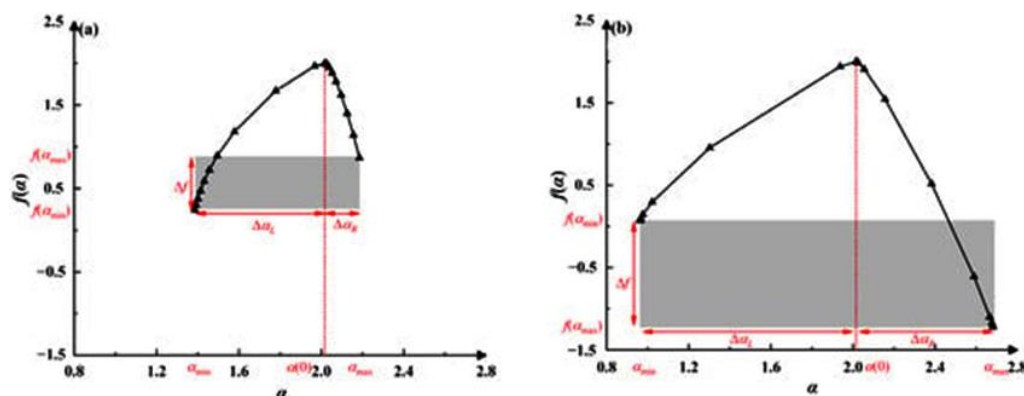


Рис. 6. Мультифрактальные спектры: (a) Cu и (b) Au.

Сложность мультифрактальных спектров может быть представлена в виде четырехкомпонентного вектора $(\alpha(0), R, \Delta\alpha$ и $\Delta f(\alpha)$). Пространственное распределение элементов Cu и Au в исследуемой области демонстрирует мультифрактальность (табл. 3).

Табл. 3.

Параметры мультифрактальных спектров распределений Cu и Au в диапазоне симметричных моментов $(-10 \leq q \leq 10)$.

	α_{min}	$\alpha(0)$	α_{max}	$\Delta\alpha$	R	$f(\alpha_{min})$	$f(\alpha_{max})$	Δf
Cu	1.39	2.02	2.18	0.79	3.94	0.24	0.87	-0.63
Au	0.96	2.02	2.68	1.72	1.61	0.07	-1.22	1.29

Все они демонстрируют асимметрично выпуклые кривые, указывающие на различную степень локальной суперпозиции в геохимических распределениях рудных металлов. Значения $\alpha(0)$ этих двух элементов демонстрируют лишь незначительные колебания вокруг евклидова измерения 2 плоскости, что указывает на их сходство. Остальные три параметра, R , $\Delta\alpha$ и $\Delta f(\alpha)$, дополнительно исследуются для интерпретации геохимического распределения рудных элементов и их ассоциаций. Существуют две характеристики параметров, которые могут указывать на наличие различных геологических процессов, приводящих к локальным закономерностям обогащения или дефицита. Геохимиков в первую очередь интересуют мультифрактальные спектры, которые демонстрируют значительные отклонения влево и большую ширину. Значения R как для элементов Au, так и для Cu превышают 1, что указывает на асимметричный характер мультифрактальных спектров с левосторонним распределением

для обоих элементов. Значения Cu значительно выше, чем значения Au, причем последние демонстрируют более выраженный перекося влево. Это говорит о том, что Cu преимущественна в этом районе в отличие от Au. Эти результаты согласуются с наблюдаемыми закономерностями распределения концентраций Cu и Au в районе. По сравнению с Cu Au демонстрирует более широкую ширину мультифрактального спектра $\Delta\alpha$ и положительное значение Δf , что указывает на более высокую вероятность обогащения в относительно узком диапазоне. Совместная интерпретация вышеупомянутых трех параметров предполагает, что Cu локализована на большой площади, в то время как Au на меньшей.

4.3. Анизотропная сингулярность.

Реализация предлагаемого алгоритма анизотропной сингулярности в исследуемом районе включает следующее:

(1) При выборе места отбора геохимических проб начальное прямоугольное окно обозначается как $A_1(A=\varepsilon_1 \times 1, \varepsilon_1=1 \text{ км})$. Ряд север ориентированных прямоугольных окон определяются размерами $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2 (\varepsilon_2=1 \text{ км}, 2 \text{ км}, 3 \text{ км}, 4 \text{ км}, 5 \text{ км} \text{ и } 6 \text{ км})$ (где ε_2 колеблется от 1 до 6 км);

(2) В каждом масштабе ε_i определен интервал поворота окна на 10° для подсчета средних концентраций элементов внутри направленных окон $C[A(\varepsilon_i)]$;

(3) Максимальные и минимальные наборы концентраций элементов могут быть определены из всех окон направления;

(4) Индекс анизотропной сингулярности может быть оценен аналогично вышеупомянутым шагам;

(5) Векторы со стрелками используются для обозначения всех азимутов выбранных окон в каждом масштабе, которые затем суммируются для представления анизотропной миграции и/или распределения рудных элементов;

(6) Реализуя эти этапы во всех местах отбора проб, анизотропная природа рудных элементов может быть изображена как в сеточной, так и в векторной формах, выявляя пространственные вариации.

Карты интерполяции индекса анизотропной сингулярности демонстрируют большую непрерывность и агрегацию по сравнению с картой индекса изотропной сингулярности, которая отображает дисперсию и точечные формы. Кроме того, он демонстрирует улучшенную точность прогнозирования со значительным количеством положительных индексов сингулярности в северо-западном регионе концентрации минерализации, что указывает на более высокий потенциал минерализации в этом районе (рис. 7, 8).

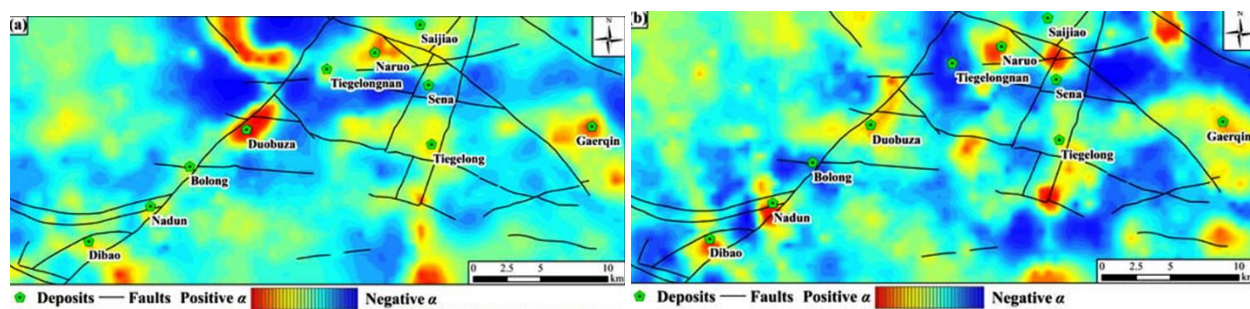


Рис. 7. Образцы сингулярности (a) Cu и (b) Au, полученные с использованием метода квадратных окон.

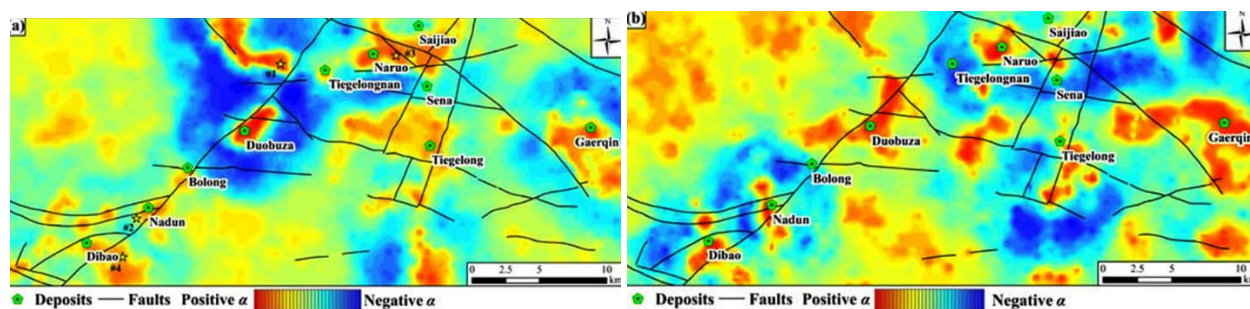


Рис. 8. Образцы сингулярности (a) Cu и (b) Au с использованием анизотропного оконного метода.

Анизотропная сингулярность не только обеспечивает более четкое представление, но и повышает общее качество анализа. Каждому месту отбора проб присваивается анизотропное направление, которое указывает конечное направление миграции рудных флюидов. Это направление определяется путем подгонки направления окна, выбранного в разных масштабах, с использованием метода векторного суммирования (рис. 4b). Если индекс сингулярности α меньше 1 ($\alpha < 1$) в данном месте отбора проб, это указывает на обогащение рудных элементов в локальной области с изменением поведения от высокого к низкому по мере продвижения к месту отбора проб извне (рис. 9).

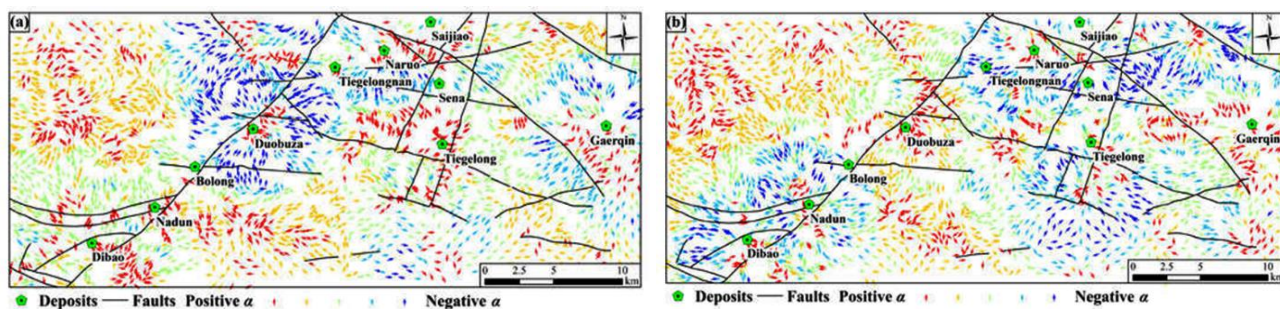


Рис. 9. Направления миграции рудных флюидов на основе индексов анизотропной сингулярности (a) Cu и (b) Au.

И наоборот, если α больше 1 ($\alpha > 1$), в этом месте происходит потеря элементов, и изменение поведения элементов в руде меняется от низкого к высокому по мере удаления от места отбора проб. Новый подход подчеркивает влияние трещиноватости магматических пород на геохимическое поведение рудных элементов, учитывая анизотропную природу минерализации. Для низкотемпературного медного элемента стрелки как вперед, так и назад

эффективно демонстрируют, что минерализация в основном контролируется разломами северо-восточного направления. Кроме того, схемы обогащения (обозначенные красными стрелками) расположены на пересечениях разломов. Северо-западные разломы преимущественно пересекают схемы истощения (обозначены синими стрелками), что указывает на их постминерализационное происхождение и доминирование в разрыве и/или реконструкции рудных месторождений в этом районе. Это убедительное доказательство значимости предлагаемого метода оценки анизотропной сингулярности для определения геохимических полей, связанных с минерализацией, и выяснения путей переноса рудных элементов. Местоположения с потенциалом минерализации Cu-Au в рудном районе Дуолонг очерчены по схемам обогащения рудными элементами, которые пространственно соответствуют обнаруженным месторождениям и обнаженным порфирам на пересечении разломов северо-западного направления. Это совпадение подтверждает, что минерализация в этом районе тесно связана с сетчатой системой разломов ромбоидной формы. Также прогнозируется, что южная и северо-западная части района могут обладать сходным потенциалом минерализации. Большинство обнаруженных месторождений полезных ископаемых расположены в районах с положительными значениями сингулярности. Следовательно, текущий алгоритм эффективен в сужении целевой области, ограничения в анализируемых данных.

4.4. Результаты и обсуждение.

Анизотропная природа рудообразующих флюидов была охарактеризована на основе представленных моделей изотропной и анизотропной сингулярности. Для демонстрации были выбраны четыре места отбора проб (рис. 8а). Как показано на этих четырех многоуровневых анизотропных окнах и стрелках (рис. 10), можно визуальнo очертить доминирующие пути миграции рудных флюидов в различных масштабах.

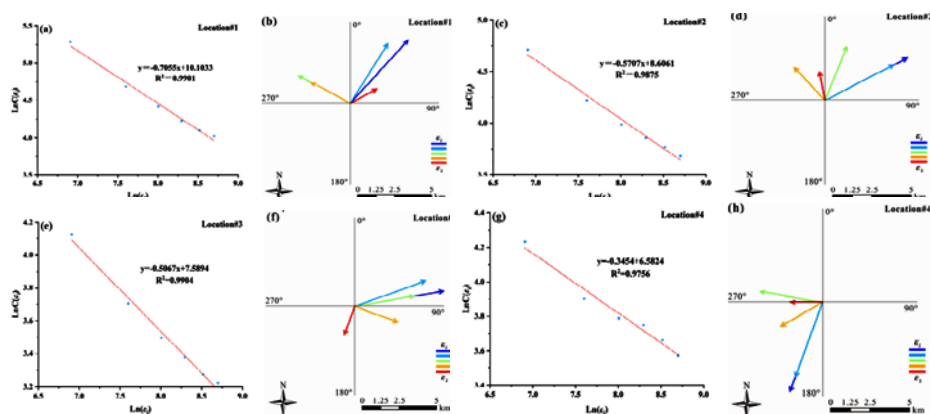
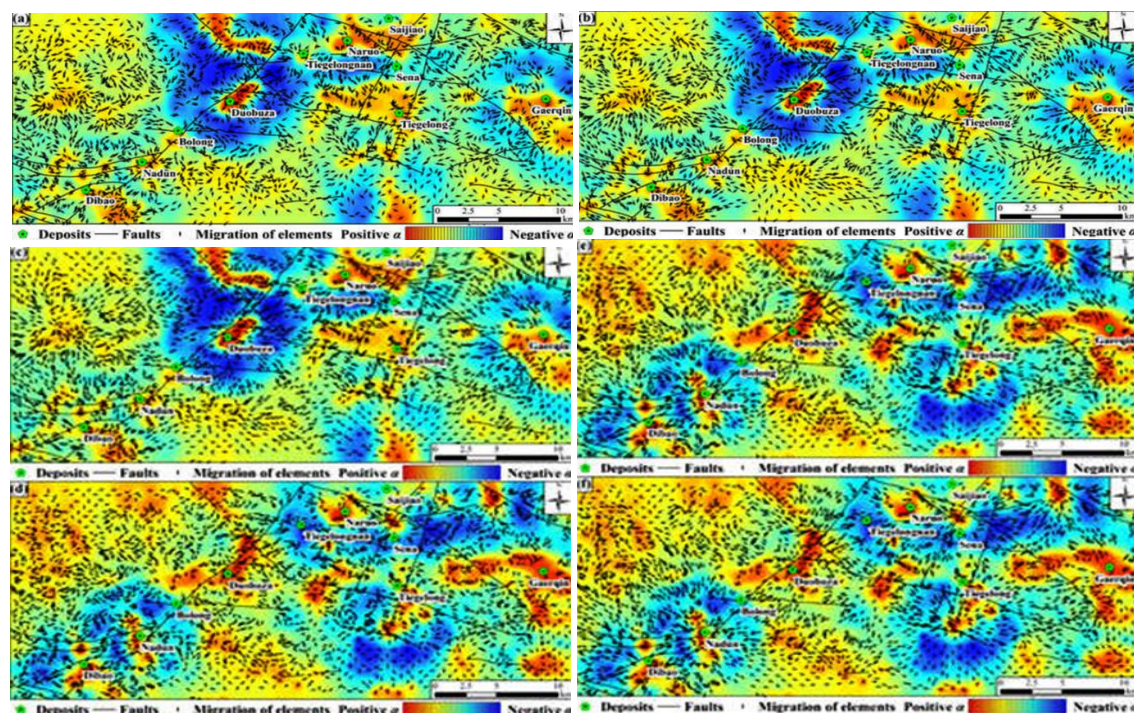


Рис. 10. Логарифмические графики и эллиптические окна для оценки индексов сингулярности Cu в четырех местоположениях на рис. 8а: (a,b) местоположение №1; (c,d) - №2; (e,f) - №3; и (g,h) - №4.

В меньших аналитических окнах стрелки, указывающие миграцию рудных флюидов, проявляют большую неравномерность и сложность (рис. 11).



Рис/ 11. Направления миграции рудных элементов на основе окон разных масштабов и базовой карты с использованием метода, основанного на анизотропных окнах.

(a) Cu 2000 м; (b) Cu 4000 м; (c) Cu 6000 м; (d) Au 2000 м; (e) Au 4000 м; (f) Au 6000 м.

И наоборот, большие аналитические окна с более высокими значениями ε_i дают более стабильные стрелочные тренды и интерпретируемые схемы миграции, указывающие на факторы, доминирующие и влияющие на миграцию в региональных масштабах. Другими словами, схемы со стрелками в региональных масштабах более подходят для представления миграции рудных флюидов, связанных с минерализацией в районе в целом.

Поскольку геохимические данные получены из образцов донных отложений, теоретически обосновано, что геохимические ореолы могут регистрировать и сохранять изменения рудного материала, вызванные минерализацией. Однако эти ореолы следует рассматривать как проекцию скрытой геологической информации на поверхность, и геохимические образцы часто подвергаются выветриванию и выщелачиванию. По сути, рудообразующие элементы внутри рудных тел были перераспределены и просочились в почвы, речные отложения и другие сторонние среды. В результате сохраненная геоинформация, связанная с минерализацией, часто ослаблена, и ее трудно идентифицировать без передовых методов извлечения геохимических аномалий. Крайне важно иметь в виду, что такие данные дают косвенные указания, которые могут быть подвержены внешним воздействиям, таким как корреляция между отрицательными индексами сингулярности (рис. 11). Поэтому следует

отметить, что литогеохимические данные могут точно отображать фактические изменения рудных элементов через первичные ореолы. В будущих исследованиях можно было бы рассмотреть возможность отбора проб сред разломных зон, контактов пород и трещиноватости, чтобы определять миграцию и осаждение гидротермальных рудоносных флюидов.

5. Выводы.

1. В данном исследовании исследуется распределение рудообразующих элементов и их взаимосвязи с помощью мультифрактального анализа. В ходе длительной геологической эволюции геохимические поля неизбежно подвергались различным степеням многоступенчатых и многофазных геологических процессов или другим естественным процессам модификации, которые приводят к присущей им фрактальной и/или мультифрактальной природе. Будучи инструментом для характеристики вариаций геохимического распределения, мультифрактальные спектры играют решающую роль в выявлении статистических свойств в различных масштабах и исследовании пространственных закономерностей геохимического распределения. Индекс асимметрии R играет решающую роль в оценке потенциала минерализации района. Когда $R > 1$, отверстие с левой стороны больше, чем с правой, что указывает на то, что фракция с высоким содержанием ценности демонстрирует большие различия в средней плотности, чем фракция с низким содержанием, в разных частях района, тем самым способствуя обогащению минерализацией. Диапазон значений мультифрактальных спектров позволяет оценить потенциал минерализации. Более высокое значение указывает на более дисперсное распределение элементов, благоприятствующее минерализации. Геохимические распределения Cu и Au в рудном районе Дуолонг демонстрируют закономерности, благоприятствующие минерализации. Дальнейшая интерпретация параметров с помощью мультифрактального анализа показывает, что элементы Cu слабо обогащены в региональном масштабе, в то время как элементы Au высоко обогащены в локальном масштабе.

2. Предложен новый алгоритм оценки индекса сингулярности, который учитывает анизотропию и практически применяется для характеристики пространственных изменений рудообразующих элементов в рудном районе Дуолонг, Тибет, Китай. Он не только улучшает идентификацию слабых аномалий, но и характеризует изменения в геохимическом распределении. Суммируя направления с наиболее значительным изменением в разных масштабах, можно определить направление миграции рудообразующих флюидов. Результаты показывают, что разломы северо-восточного направления являются основными структурами, контролирующими минерализацию в исследуемом районе, а пересечения между северо-

восточными и северо-западными разломами являются благоприятными местами для минерализации.

3. Новый метод анизотропной сингулярности служит надежным индикатором для отслеживания источника оруденения и прогнозирования его потенциала. Он может определить местоположение рудообразующих элементов и направления их миграции, что является важным поисковым признаком рудных месторождений.

V. ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЧВЫ ПРИ ПОИСКАХ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ (*Северный Китай*) [1]

1. Введение.

Глинистые минералы почвы являются идеальными переносчиками активных металлических элементов. В почве в больших количествах присутствуют оксиды железа и марганца. По мере уменьшения размера частиц почвы удельная поверхность оксидов железа и марганца увеличивается экспоненциально, а их способность адсорбировать активные металлические элементы возрастает. Мелкозернистые вещества в почве являются естественными “колодцами-ловушками” для активных элементов. Метод анализа почвы разделяет мелкозернистые компоненты, обогащенные активными металлическими элементами и позволяет выявлять скрытые рудные тела. По сравнению с другими геохимическими методами, метод анализа мелкозернистых почв проще использовать при отборе проб в полевых условиях и лабораторном анализе.

В этом материале приведены результаты исследований на трех типичных закрытых территориях - зона пустыни Гоби, зона лугопастбищных угодий и зона аллювиальных отложений на севере Китая (рис. 1).



Рис. 1. Покрываемые территории Китая и расположение месторождений.

2. Материалы и методы.

2.1. Геологические условия.

Месторождение Хуаньюшань в засушливой местности, покрытой пустыней Гоби расположено на северо-западе Китая, занимая общую площадь около 1 435 000 км². Оно относится к палеоазиатской металлогенической области, объединяющей три полиметаллические зоны: Тяньшань, Бэйшань и Цилиань. Выбранным эталоном является свинцово-цинковый рудник Хуаньюшань на среднем западе орогенного пояса Бэйшань.

Геотектонически он находится в раннепалеозойском рифте Шуаньиншань на северной окраине блока Дуньхуан Таримской палеозеи. Обнаженный пласт в районе добычи представляет собой синьскую группу - набор метаморфических пород, в основном состоящих из мраморов, филлитов и сланцев, а четвертичный покров - аллювиальный гравий и песчаная глина. Магматическая активность в основном проявляясь в виде крупномасштабных вторжений индосинского сиенита, монзонитового гранита и мелкозернистого порфирового гранита.

Месторождение Чжунсуйцзихуа расположено в полусухой местности, покрытой лугами в восточной части Внутренней Монголии, занимая площадь около 323 900 км². Выбранным эталоном является медно-молибденовое месторождение Чжунсуйцзихуа. Оно расположено в позднепалеозойском континентальном аккреционном поясе юго-восточной континентальной окраины Сибирской плиты и принадлежит позднепалеозойско-мезозойскому металлогеническому поясу Эрлян-Дунвуки. Коренные, обнаженные пласты представляют собой обломочные породы каменноугольно-пермского периода, а покровные - склоновые отложения голоцена. Каменноугольно-пермские пласты в основном представляют собой метаморфический полевошпатовый кварцевый песчаник и алевритовый сланец. Четвертичный слой состоит в основном из глины, песка и гравия, в некоторых местах встречаются эоловые пески. Обнаженные магматические породы в исследуемом районе в основном представляют собой варисканские гранодиориты, тесно связанные с минерализацией Cu и Mo.

Месторождение Цзяоцзя в местности, покрытой аллювиальными осадками, расположено в средней части золоторудного металлогенического пояса Цзяоцзя. Оно связано с зоной разлома Цзяоцзя северо-восточного направления, где выявлено большое количество вторичных разломов, участков трещин и зон гидротермально-метасоматических изменений. Под четвертичным чехлом находятся яньшанские монзонитовые граниты Цуйчжао - Линглонг и порфировый позднеяньшанский гранодиорит Гоцзялин.

2.2. Отбор проб и анализ.

Вдоль 26 разведочных профилей свинцово-цинкового *м-ния Хуаньюшань* были отобраны почвенные пробы через 50 м, глубина отбора 10-30 см. Образцы мелкой фракции почвы (<76 мкм), состоящие из 3-5 подвыборок в радиусе 5 м вокруг точки отбора проб, были проанализированы на свинец, цинк и др. элементы методом плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS). Предел обнаружения составлял 2 ppm, а уровень отчетности - 100%. Уровень соответствия стандартных эталонных материалов и чистых образцов составил 100%, а дублирующих образцов - 98% (рис. 2).

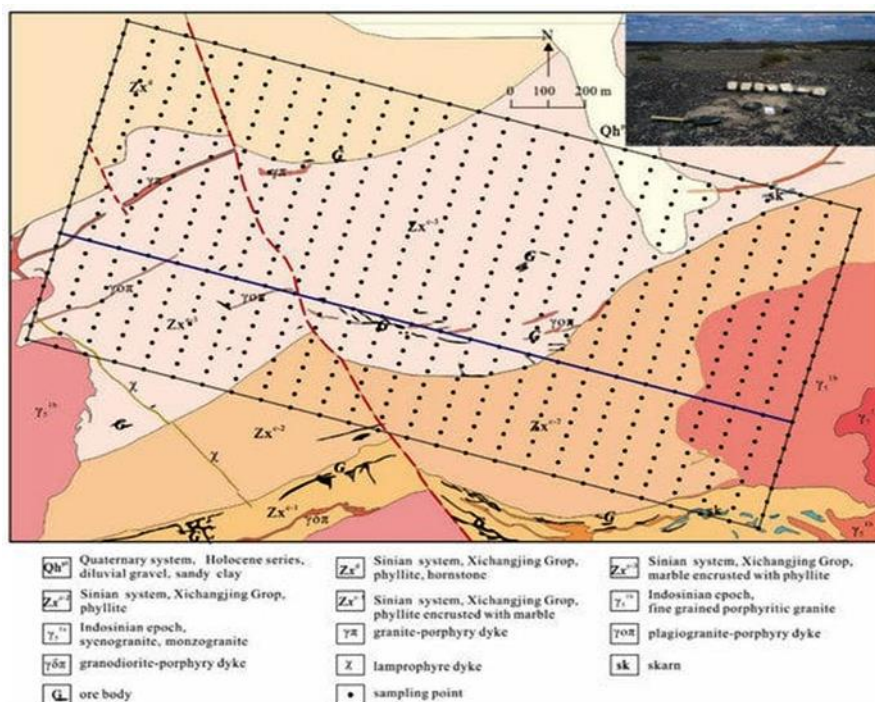


Рис. 2. Геологическая карта и места отбора проб на Pb-Zn м-нии Хуаньюшань.

Вдоль 11 разведочных линий медно-молибденового *м-ния* Чжунсуйцзихуа был произведен отбор проб через 80 м на глубине 5-30 см. Образцы мелкой фракции почвы (<76 мкм), состоящие из 3-5 подвыборок на расстоянии 5 м вокруг точки отбора проб, были проанализированы на медь, молибден и др. методом плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) с отчетностью 100%. Предел обнаружения Cu составлял 1 ppm, а Mo - 0,2 ppm. Уровень соответствия стандартным эталонным материалам, пустым образцам и дублирующим образцам составил 100% (рис. 3).

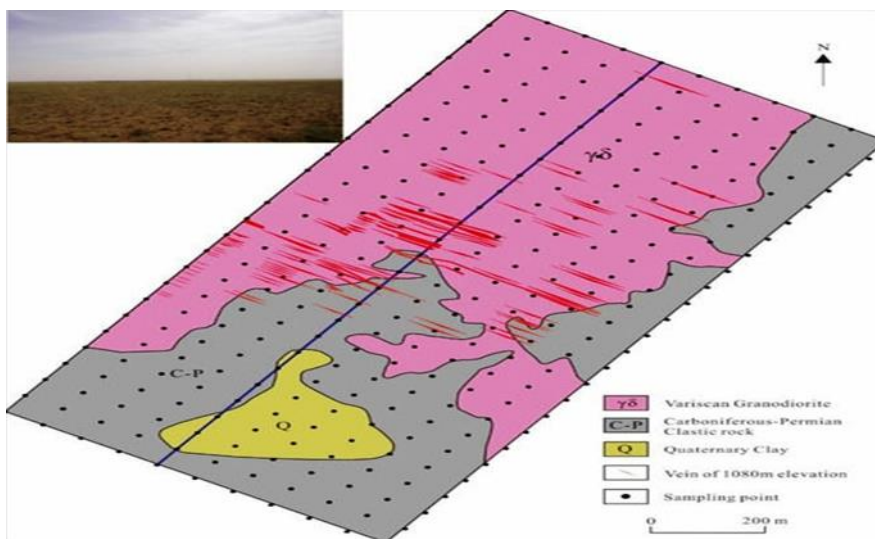


Рис. 3. Геологическая карта и места отбора проб на Cu-Mo м-нии Чжунсуйцзихуа.

Образцы мелкой фракции почвы (<125 мкм), состоящие из 3-5 подвыборок в радиусе 5 м от точки отбора проб, были отобраны вдоль 9 разведочных линий через 80 м на *м-нии* Цюйцзя.

Золото, серебро и др. элементы были проанализированы методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрии (ААН) с пределом обнаружения 0,2 ppb, а Ag анализировали методом плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) с пределом обнаружения 20 ppb. Уровень отчетности составил 100%. Уровень соответствия стандартным эталонным материалам и пустым образцам составил 100%, а уровень соответствия дублирующимся образцам - 97,4% (рис. 4).

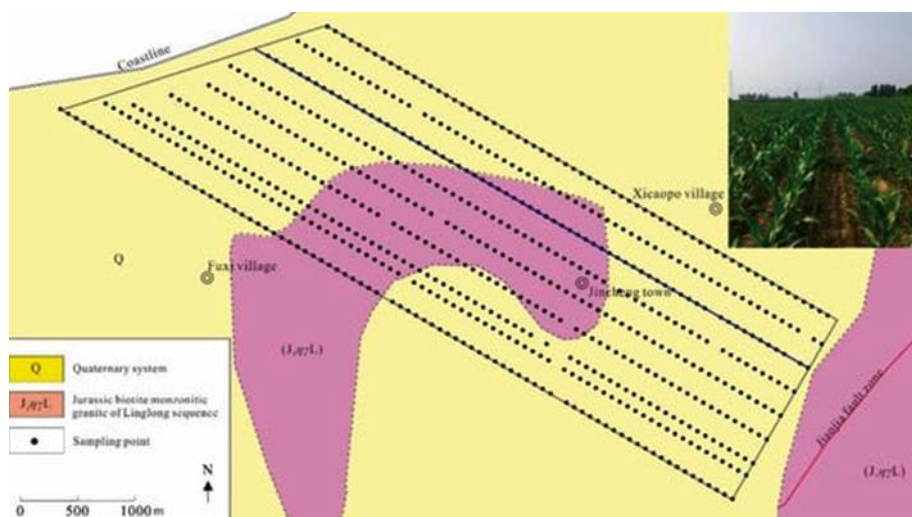


Рис. 4. Геологическая карта и места отбора проб на м-нии Цюйцзяо.

3. Результаты.

3.1. Исследования м-ния Хуаньюшань.

Основным оруденением на м-нии Хуаньюшань являются Pb и Zn. Содержание Pb в мелкозернистых почвах колеблется между 52,7 и 7806,6 ppm, при среднем значении 406,4 ppm и 779,5 ppm, что значительно выше, чем в пустыне Гоби (среднее значение 14,1 ppm и среднее значение 15,5 ppm). Содержание Zn колеблется между 86,1 и 5807,4 ppm, при среднем значении 300,9 ppm и 525,5 ppm, что также значительно выше, чем в пустыне Гоби (среднее значение 45,2 ppm и 49,7 ppm).

Проверка размера частиц на м-нии Хуаньюшань показывает, что содержание элементов в мелкозернистых образцах значительно выше, чем в крупнозернистых (рис. 5).

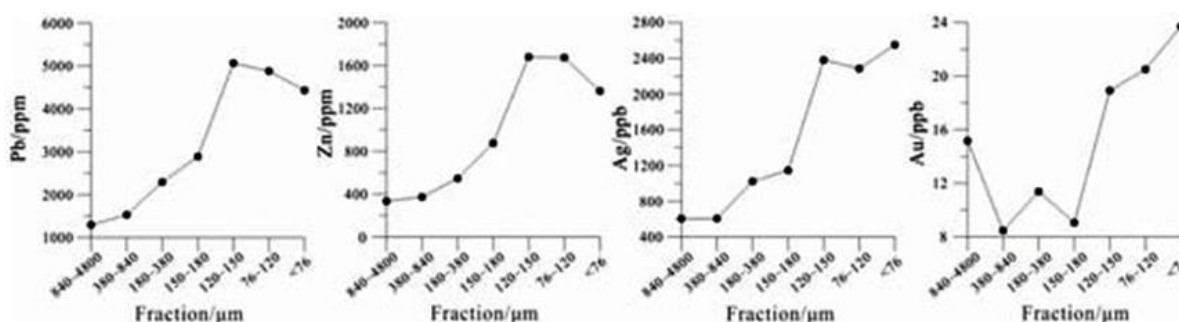


Рис. 5. Линейные диаграммы Pb, Zn, Ag и Au в почвенных фракциях разного размера на Хуаньюшань.

В более мелкозернистой фракции почвы содержание Pb составляет 5066 ppm в фракциях 120-150 мкм, 4879 ppm в фракциях 76-120 мкм и 4432 ppm в фракциях <76 мкм соответственно. Содержание Pb в более крупной фракции составляет 1295 ppm в фракциях 840-4800 мкм и 1529 ppm в фракциях 380-840 мкм соответственно. В совокупности содержание Pb в мелкой фракции выше, чем в крупной фракции. Zn, Ag и Au также демонстрируют схожую картину. В частности, содержание Pb, Zn, Ag и Au в мелкозернистой почве примерно в 3,40, 4,45, 3,97 и 1,78 раза выше, чем в крупнозернистой почве, соответственно. Эти результаты показывают, что мелкозернистая почва является хорошей средой для отбора проб для геохимических исследований в пустыне Гоби.

Линейная диаграмма содержания Pb и Zn в мелкой фракции почвы (<76 мкм) поперек скрытой минерализованной зоны (линия съемки отмечена синей линией на рис. 2) показана на рисунке 6.

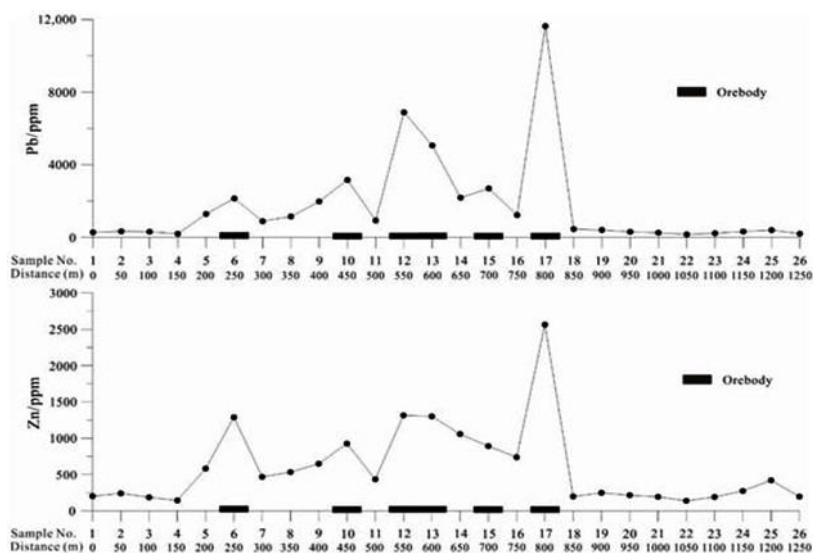


Рис. 6. Линейные диаграммы Pb и Zn образцов мелкозернистого грунта (<76 мкм) в скрытом рудном теле.

Образец № 17 (800 м) над рудным телом содержит самое высокое содержание Pb, 11 637 ppm, что примерно в 40 раз превышает содержание Pb в фоновой зоне (около 300 ppm в образцах № 1-4 и № 20-26). Второе по величине содержание Pb составляет 6891 ppm (образец № 12), которое также обнаружилось выше рудного тела (550 м) и примерно в 20 раз превышает фоновое содержание. Аналогичным образом, другие высокие значения содержания Pb также наблюдаются над рудным телом. Аналогичное распределение наблюдается и для Zn. Эти результаты демонстрируют, что использование мелкозернистой фракции почвы может указывать на минерализацию Pb и Zn в пустыне Гоби.

Результаты площадных измерений мелкозернистого грунта свинцово-цинкового м-ния Хуаньюшань показаны на рисунке 7. Значение, соответствующее 85% квантилю, классифицируется как выброс, а аномальная область на геохимической карте окрашена от

оранжевого до темно-красного. Горизонтальный разрез рудного тела накладывается на контурную карту, чтобы показать характеристики геохимического распределения элементов и позиционную взаимосвязь между аномалиями элементов (от оранжевого до темно-красного на рисунке 7) и рудным телом.

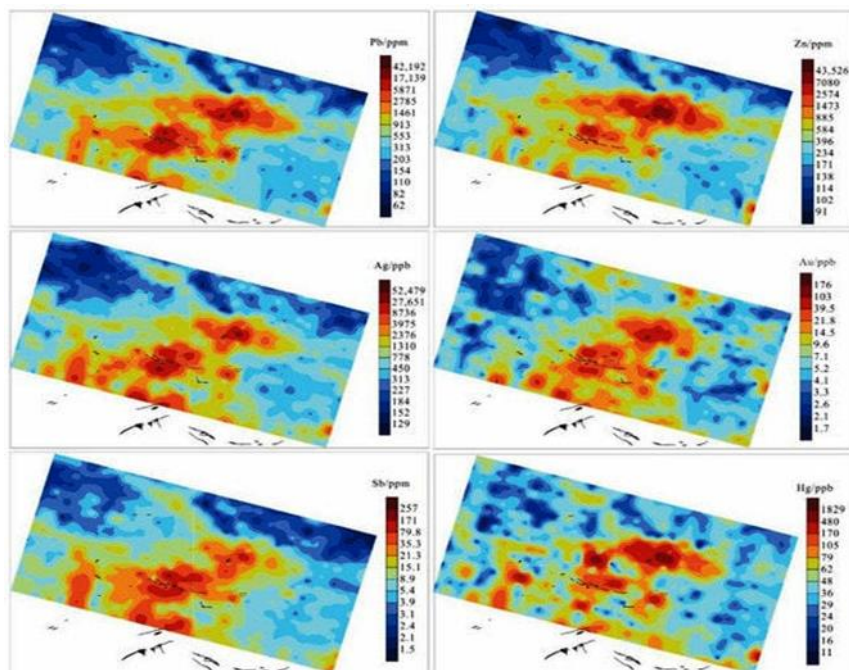


Рис. 7. Геохимическая карта содержаний Pb-Zn в мелкозернистых почвах на м-нии Хуаньюшань

Результаты показывают, что геохимические карты основных рудообразующих элементов (Pb и Zn) и элементов-индикаторов (Ag, Au, Sb и Hg) схожи, а многоэлементные аномальные сочетания в основном сосредоточены в середине скрытой рудной зоны, распространяясь с востока на запад, с центром высокой концентрации. Аномалия является непрерывной и очень хорошо соответствует рудному телу № 2. В то же время аномалия не замкнута в экспериментальной зоне и соответствует рудному телу № 3 за пределами экспериментальной зоны. Таким образом, метод анализа мелкозернистой почвы может эффективно указывать на глубоко скрытые рудные тела и может использоваться как эффективный метод поиска месторождений в пустыне Гоби.

3.2. Исследования м-ния Чжунсуйцзихуа.

Мо и Си являются основными рудными элементами на м-нии Чжунсуйцзихуа. Содержание Мо в мелкозернистой почве колеблется от 0,93 до 5,69 ppm, при среднем значении 1,77 ppm и 1,97 ppm, что значительно выше, чем в зоне полусухих лугопастбищных угодий (среднее значение составляет 0,75 ppm, а среднее значение - 0,99 ppm). Содержание Си колеблется от 13,1 до 43,1 ppm, со средним значением 23,8 ppm и средним значением 24,9 ppm, что также

значительно выше, чем в зоне полусасушливых лугопастбищных угодий (среднее значение 12,1 ppm и среднее значение 15,1 ppm).

Результаты теста на размер частиц показаны на рисунке 8.

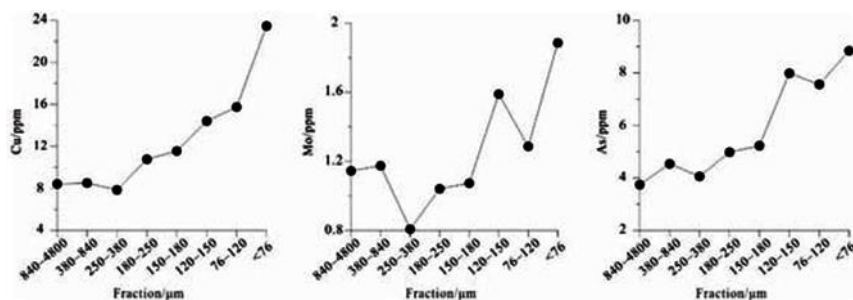


Рис. 8. Линейные диаграммы, показывающие концентрации Cu, Mo и As в различных по размеру фракциях почвы на м-нии Чжунсуйцзихуа.

Содержание Cu составляет 23,5 ppm в самой мелкой фракции (<76 мкм) почвы и 8,40 ppm в самой крупной фракции (840-4800 мкм). Более высокое содержание элементов в мелкой фракции и более низкое содержание элементов в крупной фракции также были обобщены с содержаниями Mo и As. Содержание Cu, Mo и As в мелкозернистой почве примерно в 2,79, 1,65 и 2,36 раза выше, чем в крупнозернистой почве, соответственно. Таким образом, мелкозернистая почва является подходящей средой для отбора проб для геохимических исследований на полусасушливой территории, покрытой лугами. Результат аналогичен результату на засушливой территории, покрытой пустыней Гоби.

На рисунке 9 показана линейная диаграмма содержаний Cu и Mo в мелкозернистой почве (<76 мкм) над скрытой рудной и фоновой зонами (синяя линия на рис. 3).

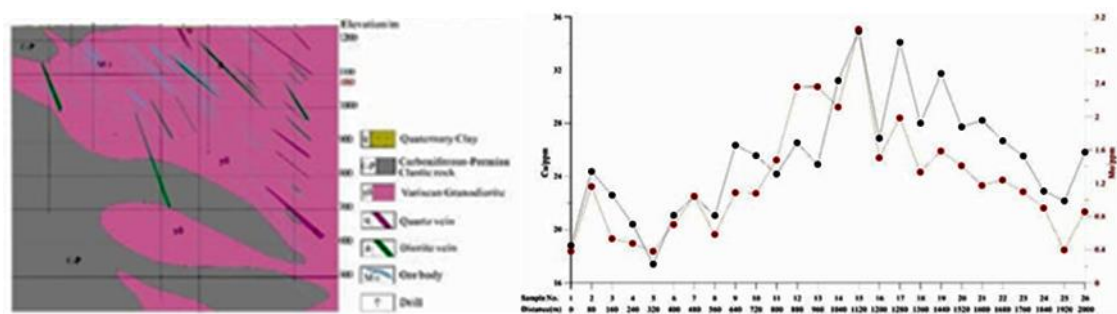


Рис. 9. Линейная диаграмма содержаний Cu и Mo образцов мелкозернистого грунта (<76 мкм) над скрытым рудным телом на м-нии Чжунсуйцзихуа.

Образец № 15 (1120 м) имеет самое высокое содержание Cu - 34,92 ppm, за ним следует образец № 17 (1280 м)-34,08 ppm. Оба образца были взяты выше месторождения. Даже самое низкое содержание Cu в 17,4 ppm (образец № 5, на высоте 320 м) составляет лишь половину от самого высокого значения. Содержание Cu, как правило, выше над рудным телом и ниже вдали от рудного тела. Эта тенденция также наблюдается в отношении Mo. Эти результаты демонстрируют, что использование мелкозернистой фракции почвы может указывать на

минерализацию Cu и Mo в полусухих районах, покрытых пастбищами. Результат аналогичен результату для засушливой территории пустынь Гоби.

Результаты площадных измерений мелкозернистого грунта на медно-молибденовом м-нии Чжунсуйцзихуа показаны на рисунке 10.

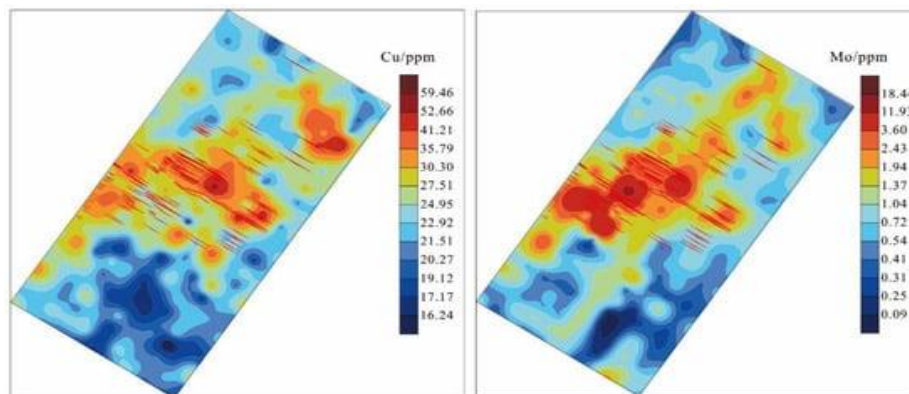


Рис. 10. Геохимическая карта содержаний Cu-Mo мелкозернистых почв на м-нии Чжунсуйцзихуа

Аномалии Cu и Mo (от оранжевого до темно-красного) распределены в середине исследуемой территории неправильной полосой. Аномалии полностью соответствуют площади вертикальной проекции молибденового рудного тела 1080, которое окружено аномалиями. В то же время более крупные кольцевые аномалии Cu и Mo также появляются в северо-восточном углу. Аномальное распределение Cu и Mo больше соответствует распределению рудных тел, особенно Mo, что указывает на то, что метод может эффективно определять скрытые рудные тела Cu и Mo. В целом, метод может быть использован для поисков месторождений в полусухих пастбищных районах.

3.3. Исследования м-ния Цюцзя.

Основным рудным элементом является золото. Содержание Au в мелкозернистом аллювии колеблется от 0,37 до 249,56 ppb, со средним значением 5,44 ppb и средним значением 21,06 ppb, что значительно выше, чем в целом в Китае (1,40 ppb) и в провинции Шаньдун (1,53 ppb).

На рисунке 11 показаны линейные диаграммы Au, Ag, Co и Cr над скрытой минерализованной зоной и над безрудными участками (синяя линия на рис. 4).

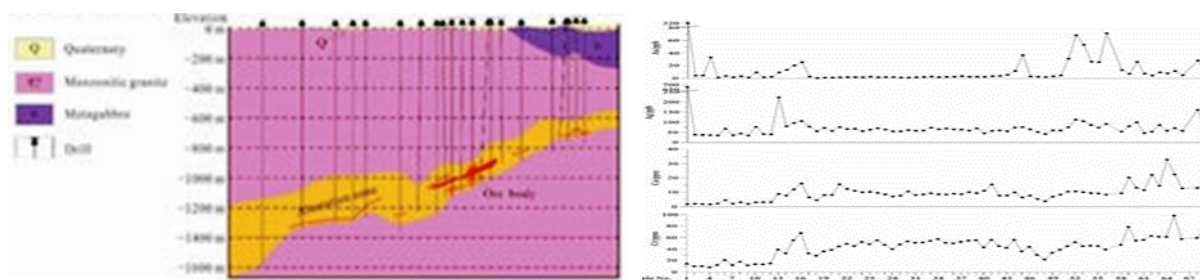


Рис. 11. Линейные диаграммы Au, Ag, Co и Cr мелкозернистого аллювия (<125 мкм) над скрытым рудным телом на м-нии Цюцзя.

Содержание Au над рудным телом (образец № 51-57, 4000-4480 м) составляет 25,7–71,4 ppb, что в 10-30 раз превышает содержание Au в фоновой зоне (около 2 ppb, образец № 18-37, 1360-2880 м). Содержание Au наиболее высокое над рудным телом и более низкое дальше от рудного тела. Ag отображает распределение, аналогичное Au. Содержание Co и Cr самое высокое над массивом основных горных пород и ниже по мере удаления от него. Эти результаты демонстрируют, что использование метода может указывать на минерализацию Au и геологический фон на территориях, покрытых аллювием.

Геохимические карты Au и Ag (рис. 12), полученные методом анализа мелкозернистых почв на м-нии Цюйя, очень похожи.

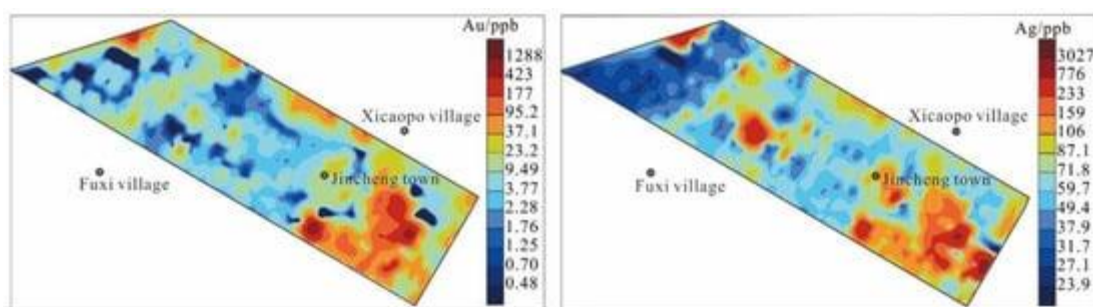


Рис. 12. Геохимическая карта содержаний Au, Ag в аллювиальном покрове на месторождении Цюйя.

Аномальные зоны (от оранжевого до темно-красного) в основном распределены на юго-востоке площади м-ния, что соответствует глубоко скрытым рудным телам. Область аномалий велика и имеет высокую интенсивность. Аномалия простирается на юго-запад, что соответствует соседнему рудному району Чжаосянь. Аномалия также проявляется на северо-западе с высокой интенсивностью, таким образом, она не замкнута внутри тестовой зоны. Результаты показывают, что поверхностные геохимические аномалии соответствуют известным рудным телам и новым аномалиям в неизвестных областях, подтверждая эффективность метода для поисков глубоко скрытых рудных тел, перекрытых аллювиальными образованиями.

4. Обсуждение.

На севере Китая многие территории покрыты золотым песком и некоторым другим переносимым покровом (аллювиальная почва и т.п.). Они могут перемещаться на большие расстояния и откладываться далеко от источника, влияя на эффективность механизмов миграции металлов в покрове и на поиски. Минеральный состав и подвижность посторонних веществ делают его наиболее мешающим для геохимического картирования в северном Китае. Метод мелкозернистой разведки почвы позволил достичь оптимальных результатов на покрытых территориях.

Предложено множество теорий миграции металлических элементов через покрывающий слой. К ним относятся физическое и химическое высвобождение элементов в процессе выветривания, вынос на поверхность растворенных элементов в круговороте грунтовых вод, диффузия ионов, окислительно-восстановительный потенциал, испарение, поглощающая способность корневой системы растения, газораспределение и элементы, переносимые газом. Механизмы переноса металлов вверх через транспортируемый покров обобщены в таблице 1).

Табл. 1.

Краткое описание различных механизмов переноса металлов вверх через покров.

	Mechanism	Force	Medium	Process	Limiting Factors
Phreatic	Dilatancy pumping	Stress	Water	Groundwater pumped upwards due to compressional stress along faults or fractures. Arid climates favor rapid evaporation and restriction of metals	Requires neotectonic active areas/faults through transported cover. Confirmation of visible groundwater effusion after earthquakes
	Glacial tectonic pressure	Stress	Water	Groundwater pumped upwards in more porous zones due to change in hydraulic gradient as ice shifts	Requires retreating glacial ice. Requires preferential flow paths through the cover via faults and fractures
	Convection (heat)	Heat	Water	Faster upward migration of ions due to currents generated by density or heat	Needs sulfide-rich oxidizing deposit. Effectiveness over deposit not fully proven. Limited to water table
	Bubble	Pressure/buoyancy	Gas	Metal ions and nanoparticles attach to upward streaming carrier gas bubbles (CO ₂)	Fate of bubbles and attached particles is unclear
	Diffusion (indirect effects)	Concentration gradient	Water	Diffusion along concentration gradient from deep to surface	Very slow process, with only H ⁺ migrating fast enough through saturated cover
	Spontaneous potentials	Self-potentials	Water	Electrical currents set around from sulfide ore with concentration of cations at edges	Process is limited to shallow cover. Relies on diffusion process to pass through thick cover
	Redox gradient	Redox gradient	Water	Redox differences between oxidizing near surface and reducing base of cover. Faster migration in voltaic gradient	Needs saturation conditions and associated redox gradient for effective transfer
Vadose	Capillary	Pressure/suction	Water	Surface tension-related rise of groundwater above water table. Evaporation at surface drives suction upwards	Upward extent is unclear and operation in heterogeneous textural materials are unproven. Groundwater generally is at >10 m in arid areas
	Gaseous diffusion	Concentration gradient	Gaseous	Oxidizing ore body produce gases (CO ₂ , COS, SO ₂ , CH ₄) and volatiles (Hg, AsH ₃) diffusion through porous media	Migration along preferential pathways (structural conduits). Gas signal is complicated by biological released gases. Temporal stability of many gaseous species is limited
	Barometric pumping	Pressure	Gaseous	Rapid advective transport of gases in fractured media via barometric pumping	It is limited to fractured media
	Gas convection	Heat gradient	Gaseous	Air temperature differences drive hotter gases from the ore body upwards	Limited to hilly regions or for low-relief regions, permeable covers, high sulfide contents, and oxidizing conditions
	Plant uptake and release to surface via litter	Physiological/pressure	Water/regolith	Absorption of metals from water table or anomalous zone, accumulation in organs and release to surface via litter	Limited to root penetration depths (maximum 30 m). Anomalous water or regolith is required for plants to give a response. Species-related uptake is unclear
	Plant uptake and release to soil-hydraulic lift	Physiological/pressure	Water/regolith	Water absorption from depth (water table) and release near surface (upper soil horizon)	Metal transfer with water is not confirmed. Depth from which water is lifted is poorly constrained. Limited to understanding of the process
	Bioturbation and gravity	Animal metabolism	Regolith	Vertical and lateral movement of material from depth to surface by burrowing activities of conveyor belt organisms (termites and ants)—biomantle	In many areas, it is limited by depth of biomantle (<5 m). Further information on burrowing depths of ants and termites in dry settings

Был предложен многоэлементный механизм миграции, основанный на взаимодействии земного газа. Предполагается, что в засушливой местности Гоби информация о минерализации под покровом может быть выявлена на уровне нано- и микроуровней. Элементы высвобождаются из рудного тела и связанных с ним измененных пород в процессе выветривания. Из-за засушливого климата Гоби глубина залегания грунтовых вод составляет сотни метров, а растительность редка. Таким образом, вода и растительность, по-видимому,

играют очень ограниченную роль в переносе элементов вверх, к поверхности, несмотря на испарение и капиллярное действие растений, потенциально способствующих усвоению минералов во время дождей.

Следовательно, процесс миграции зависит от множества агентов, при этом газ рассматривается как основная среда для вертикальной миграции элементов. Убедительные доказательства получены в результате детальных исследований земного газа и почвы над рудными телами с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), оснащенного энергодисперсионной спектроскопией. Эта технология позволяет определять характеристики сложных нанометаллических частиц в руде, геогазе и почве в масштабе от нескольких десятков до сотен нанометров. Это также было подтверждено в засушливой среде Австралии и Чили.

После миграции активных металлических элементов из глубинных рудных тел на поверхность они неизбежно будут встречаться в поверхностной среде в различных формах, включая ионные соединения, комплексы, растворимые соли, коллоиды, элементарные частицы и частицы минеральных сплавов. Независимо от того, в какой форме они существуют, активные металлические элементы часто заряжены положительно, поэтому они легко адсорбируются отрицательно заряженными глинистыми минералами и/или оксидами железа и марганца. Глинистые минералы являются наиболее важными вторичными минералами в почве, в основном вторичными кристаллическими слоистыми силикатами, включая каолин, монтмориillonит, иллит, хлорит, гидрослюда и вермикулит. Коллоидная поверхность глинистых минералов заряжена и имеет большую удельную поверхность, поэтому она является идеальным носителем активных металлических элементов, а глинистые минералы в основном содержатся в мелкозернистых компонентах почвы. Кроме того, оксиды железа и марганца в изобилии содержатся в поверхностной почве, а пленки оксидов железа и марганца часто покрывают поверхность минеральных частиц. Удельная площадь поверхности оксида железа-марганца в почве увеличивается экспоненциально с уменьшением размера образца (рис. 13).

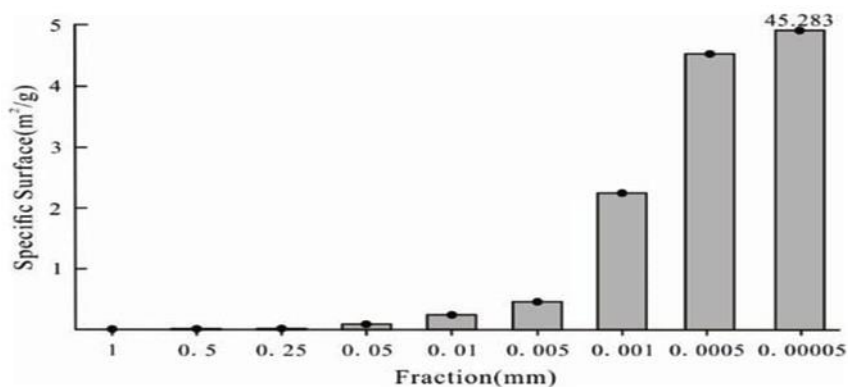


Рис. 13. Удельная поверхность различных фракций зернистости в почве.

Чем больше удельная площадь поверхности, тем сильнее ее способность адсорбировать активные металлические элементы. Следовательно, физическое разделение мелкозернистых компонентов почвы может эффективно обогащать почву активными металлическими элементами. Например, в засушливых районах пустыни Гоби, по мере уменьшения размера частиц почвы увеличивается количество таких элементов, как Al_2O_3 , Fe_2O_3 и Mn , представляющих собой глинистые минералы и оксиды железа и марганца. Одновременно увеличивается и содержание рудообразующих элементов (рис. 14).

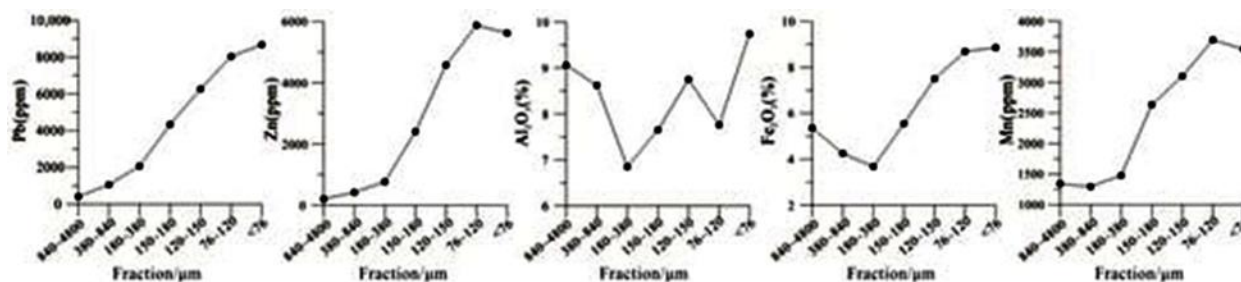


Рис. 14. Линейная диаграмма Pb, Zn, Al_2O_3 , Fe_2O_3 и Mn в различных фракциях почвы пустыни Гоби.

Мелкозернистые фракции являются естественными “колодцами-ловушками” для активных металлических элементов из-за их сильных свойств адсорбции и обмена.

В пустыне Гоби золотой песок является основным фактором, препятствующим отбору проб среды для геохимических исследований. На долю золотых песков приходится очень низкая доля частиц размером >830 и <120 мкм, и более 90% золотых песков сосредоточено в частицах размером 120-830 мкм. Таким образом, крупнозернистая почва (>830 мкм) и мелкозернистая почва (<120 мкм) не нарушаются золотым песком, и обе могут быть эффективными материалами для отбора проб для исследований минерализации. Более крупная фракция почв (массовая доля составляет 21,9%) состоит в основном из кварца и полевого шпата, за которыми следуют гипс и кальцит. В промежуточной фракции (120-830 мкм) преобладают кварц, гипс, полевой шпат и кальцит с небольшим количеством глинистых минералов, а ее массовая доля составляет 58,6%. Мелкозернистая фракция (массовая доля составляет 19,5%) состоит в основном из кальцита и глинистых минералов, включая иллит, каолинит и хлорит. По мере изменения размера частиц образца от крупных к мелким наблюдалось несколько тенденций: (1) содержание кварца и полевого шпата постепенно уменьшается — более крупная фракция почв содержит 32,4% кварца и 33% полевого шпата, в то время как мелкая фракция содержит 13,6% кварца и 9,4% полевого шпата соответственно, и (2) содержание глинистых минералов постепенно увеличивается, и содержание глинистых минералов в более крупной фракции почв составляет 7,7% и 40,3% в мелкой фракции. Кроме того, щелочная почва (со значением pH 7,5–9,5) может образоваться из-за того, что испарение

превышает количество осадков в этом регионе, и скальный материал в почве накапливается на поверхности под действием испарения, делая поверхностную почву щелочной. E_h отрицательно коррелирует с pH. Когда pH изменяется в определенном диапазоне, величина дзета-потенциала на поверхности глинистых минералов также изменяется. В щелочных условиях количество отрицательного заряда на поверхности глинистых минералов увеличивается. Это также подтверждено в эксперименте по адсорбции каолинитом и галлуазитом редкоземельных элементов. Кроме того, электропроводность мелкозернистых образцов в поверхностном грунте была значительно выше, чем у крупнозернистых образцов. Это может способствовать более легкому поглощению положительно заряженных ионов металлов мелкозернистыми образцами.

В этом исследовании мелкозернистый грунт представлен на трех рудных участках: Pb и Zn на м-нии Huaniushan, Co и Mo на м-нии Zhunsujihua и Au и Ag на м-нии Qujia. Этот метод также применим для месторождений других элементов, таких как медь и никель, а также редкие металлы и даже уран. В последние годы были проведены геохимические исследования регионального масштаба (1:200 000 или 1:1 000 000) с использованием метода мелкозернистой почвы. Были определены стратегические целевые зоны крупномасштабных поисков: (1) месторождений урана песчаникового типа в пустынной зоне бассейна Турфан-Хами; (2) месторождений Pb-Zn в полувасушливой местности, покрытой лугами; (3) медно-никелевого оруденения в зоне покрытия аллювиальной почвой. В частности, геохимические аномалии содержания урана в почве имеют соответствующую связь с ураносодержащими геологическими телами, включая скрытую минерализацию урана в зоне гранитных интрузий на лугопастбищных площадях.

Таким образом, приведенные выше результаты демонстрируют, что метод геохимических поисков на основе мелкозернистого грунта может выявлять скрытые рудные тела под различными покровами.

5. Выводы.

1. Геохимический метод исследования мелкозернистых почв показал положительные результаты в пустыне Гоби, в полувасушливой местности, покрытой лугами и в местности, покрытой аллювием территории северного Китая.

2. В качестве геохимической технологии, которая может отражать информацию о глубоких аномалиях, мелкозернистая почва богата глинистыми минералами, оксидами железа и марганца, с большой удельной поверхностью и высокой адсорбционной способностью, что может эффективно ее обогащать металлическими элементами.

3. Диапазон аномалий, выявленных указанным методом, хорошо согласуется с известным местоположением разнотипного оруденения. Соответствующая взаимосвязь может эффективно указывать на скрытые рудные тела и очерчивать аномалии в непоискованных областях. Таким образом, этот метод может быть применен для геохимических поисков скрытого оруденения.

VI. ОСНОВЫ ФИТОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ (Африканский медно-кобальтовый пояс) [4].

1. Введение.

Центрально Африканский меднорудный пояс (ЦАМП) — это металлоносная провинция мирового класса, в которой залежи меди и кобальта находятся в осадочных породах и простираются вдоль границы между Замбией и Демократической Республикой Конго. С момента его международного открытия в начале 1900-х годов в геологоразведке для поиска полезных ископаемых использовались различные поверхностные геохимические среды, в том числе почвы, термитники, речные отложения и обломки горных пород. В настоящее время геологоразведка все чаще направлена на поиск месторождений, скрытых на разной глубине.

Кустарники и деревья с глубокой корневой системой, устойчивые к повышенным концентрациям металлов в почве, стали предметом растущего интереса для геолого-поисковых и геохимических исследований по всему миру. В последнее время геохимия растений используется в сочетании с другими поверхностными средами для обнаружения аномалий металлов, связанных с месторождениями полезных ископаемых. Было обнаружено, что такая фитогеохимия эффективно определяет аномалии, связанные с минерализованными зонами из глубоких источников, на ряде рудных месторождений по всему миру, включая; месторождение Кангерлуарсук (Zn-Pb-Ag) в Гренландии, месторождение Твин Лейкс (Au) в Канаде и минеральные системы (IOCG) в Австралии.

Большинство видов растений проявляют чувствительность к высоким концентрациям металлов, а другие проявляют толерантность и накапливают металлы в своих корнях и/или надземных частях, таких как побеги, цветы, стебли и листья. В ЦАМП присутствуют купрофиты и кобальтофиты, представляющие широкий спектр видов растений, которые потенциально могут быть полезны при применении фитогеохимии для определения целевых показателей ГРР. Эти виды включают как гипераккумуляторы, полезные при фиторемедиации, так и эксклюзивы, связанные с фитостабилизацией. Виды растений-индикаторов были описаны как те, которые постоянно ограничены узким и характерным экологическим диапазоном и, таким образом, могут быть связаны с пространственно ограниченными минерализованными зонами. Однако независимые геологические и фитогеохимические переменные, связанные с разнообразием растительных сообществ, остаются неясными.

Цель этого исследования — (1) подробно рассмотреть геологические и геохимические факторы, влияющие на закономерности накопления металлов в почвенно-растительных системах в ЦАМП; (2) выделить потенциальные возможности для интеграции геохимии наземных растений в новые технологии ГРР; (3) выявить пробелы в исследованиях и

предложить дальнейшие направления для развития фитогеохимии как метода отбора проб при поисках скрытых рудных месторождений.

2. Пространственные тенденции геологического и геохимического воздействия на характеристики и распространение видов растений.

2.1. Геологические условия ЦАМП.

Центрально-Африканский медный пояс является одним из крупнейших экономических скоплений меди в земной коре и вносит основной вклад в глобальные запасы меди и кобальта. В ЦАМП ведется разработка месторождений в нескольких рудных районах мирового класса, включая высокосортный замбийский медный пояс (ZCB), конголезский медный пояс (CCB) и низкосортные, но высокотоннажные месторождения в регионе Доумс на северо-западе Замбии (рис. 1).

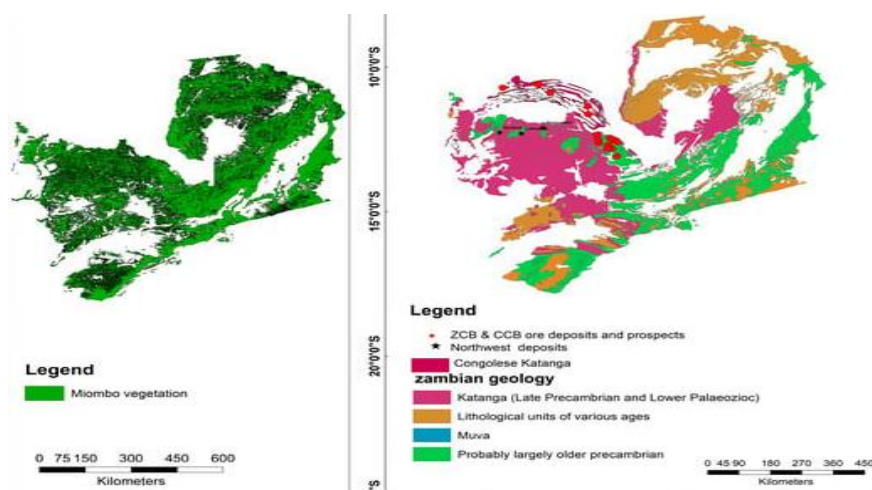


Рис. 1. Геологическая карта и карта растительности Замбии и Юга Демократической Республики Конго.

Большинство исследований предполагают непрерывную, но многоступенчатую минерализацию Cu-Co, простирающуюся от начального периода рифтообразующего осадконакопления около 815 млн лет назад до поздней орогенной стадии минерализации между 580-500 млн лет назад. Большинство рудных месторождений района залегают вблизи крупных региональных, первоначально синседиментационных разломов или крупных антиклинальных структур, связанных с инверсией бассейна. Эти структуры могут быть каналами миграции минерализованных флюидов и потенциально могут сделать металлы доступными для поглощения растениями из вод и почв.

Различные геофизические методы, которые использовались для литостратиграфического и структурного картирования в ЦАМП при ГРП оказались мало эффективными. Это связано с тем, что искомое оруденение, как правило, не является массивно сульфидным, оно немагнитно. Его нельзя выявлять электромагнитными (ЭМ) и аэромагнитными методами. Методы

индуцированной поляризации (IP) и самопотенциала (SP) имели лишь ограниченный успех, даже несмотря на то, что рудные тела характеризуются рассеянными сульфидами. Это может быть связано с обширными территориями, содержащими рассеянные сульфиды, что затрудняет надежное разделение сигналов для областей, содержащих преимущественно сульфиды меди.

2.2. Фитогеографическая характеристика ЦАМП.

Территория, на которой залегают пласты Катанган, в основном характеризуется типом растительности миомбо (рис. 1, 2), для которого характерен широкий спектр видов растений, что позволяет предположить возможность выбора видов для фитогеохимических исследований.

Congolese Copperbelt				Supergroup	Zambian Copperbelt				Generalised rock units						
Member	Formation	Subgroup	Group		Group	Subgroup	Formation	Member							
Petit Conglomerate		Biano	Kundelungu	~ 540 Ma	Kundelungu			Petit Conglomerate	Red arkose, conglomerate, shale						
		Ngule							Dolomitic sandstone						
	Kyandamu	Gombela							Glacial diamictite						
Grand Conglomerate		Bunkaya	Nguba	~ 635 Ma	Nguba			Grand Conglomerate	Shallow marine carbonate						
		Muombe							Glacial diamictite						
	Mwale								Shale and siltstone						
		Mwashya	Roan	~ 740 Ma	Roan	Upper Roan			Argillaceous and dolomitic sandstone						
	Kansuki	Dipeta													
	Mofya														
	R.G.S														
	Kambove	Mines													
	Dolomitic shales (S.D)														
	Kamoto														
		R.A.T				Lower Roan			Terrigenous sandstone and conglomerate						
							Kitwe	Copperbelt Orebody							
							Mindola clastics								
				< 880 Ma											
				Basement	Basement				Basement						

Рис. 2. Литостратиграфия ЦАМП.

Миомбо — преобладающая растительная формация в Центральной и Южной Африке, насчитывающая около 650 видов, эндемичных для этого региона. Среди этих видов растений 57 являются абсолютными металлофитами, которые встречаются исключительно на почвах, обогащённых медью и кобальтом, а 23 являются факультативными металлофитами, при этом более 75% известных популяций растений встречаются на почвах, богатых медью и кобальтом. Распределение растительности в ЦАМП связано с формой и концентрацией биодоступной меди и кобальта, а также с взаимодействием нескольких химических факторов. На разнообразие видов растений влияет ряд химических фракций меди и кобальта в почве, которые либо повышают, либо понижают биодоступность металлов. Аномалии содержания металлов в почве на минерализованных территориях являются результатом выветривания пород Катанган с естественным повышенным содержанием меди и кобальта. Процесс формирования почвы в основном обусловлен как физическими, так и химическими изменениями исходного материала горных пород, и эти процессы можно обобщить как растворение, гидратацию, гидролиз, окисление, восстановление и карбонизацию. Соединения меди и кобальта высвобождаются из

материнской породы и распределяются в различных фазах почвы, а именно: в твёрдой, коллоидной и растворимой фазах почвы в зависимости от характерных свойств почвы, таких как pH, содержание органических веществ, концентрация металлов и окислительно-восстановительные условия.

2.3. Минерализация и геохимия микроэлементов.

Типичные Cu-Co рудные минералы в ЦАМП включают халькопирит, борнит, карнотит, халькозин, гетерогенит и малахит. Эти минералы обычно распределяются вдоль плоскостей напластования и встречаются в виде конкреций или в виде прожилок и заполнений трещин как в обломочных, так и в карбонатных породах. Галенит, сфалерит, пирит и пирротин обычно присутствуют на периферии медно-кобальтовых месторождений, представляя собой свинцово-цинково-железные ореолы, которые являются характерной особенностью осадочных медно-кобальтовых месторождений. Геохимические исследования стратиформных месторождений меди демонстрируют геохимическую ассоциацию $\text{Cu-As-Ni-V-Mo-Bi} \pm \text{Pb, Zn, U, Co}$, при этом большинство элементов являются второстепенными компонентами доминирующих сульфидов Cu-Co. Ряд месторождений в Замбии связан с изменением содержания калия. Однако некоторые месторождения, такие как Кансанши и Фронтир, имеют натриевую альтерацию, в то время как большинство конголезских месторождений, как правило, имеют признаки магниальной альтерации.

Изменение гипергена имело важное значение для ЦАМП. Наиболее распространенными медьсодержащими минералами, характеризующими гипергенную зону, являются халькоцит, малахит и хризоколла; гетерогенит образует наиболее важный кобальтовый гипергенный минерал. В дополнение к этим, обычно присутствуют другие вторичные минералы Cu-Co, включая самородную медь, куприт, тенорит, азурит, либетенит, псевдомалахит, сферокобальтит и карбонат кобальта.

Наиболее известны гипергенные изменённые и минерализованные породы на небольшой глубине, но они встречаются и на глубине более 1 км. Однако большинство месторождений, связанных с гипергенной минерализацией, находятся на глубине менее 100 м. Эта глубинная зональность характеризуется поверхностной выщелоченной зоной, состоящей в основном из гематита, которая перекрывает обогащённую оксидами зону, состоящую преимущественно из малахита в карбонатных месторождениях и хризоколлы в кремнисто-обломочных породах. Ниже находится смешанная/переходная зона с совместным существованием гипергенных оксидных и сульфидных минералов, которая переходит в богатую сульфидами зону (рис. 3).

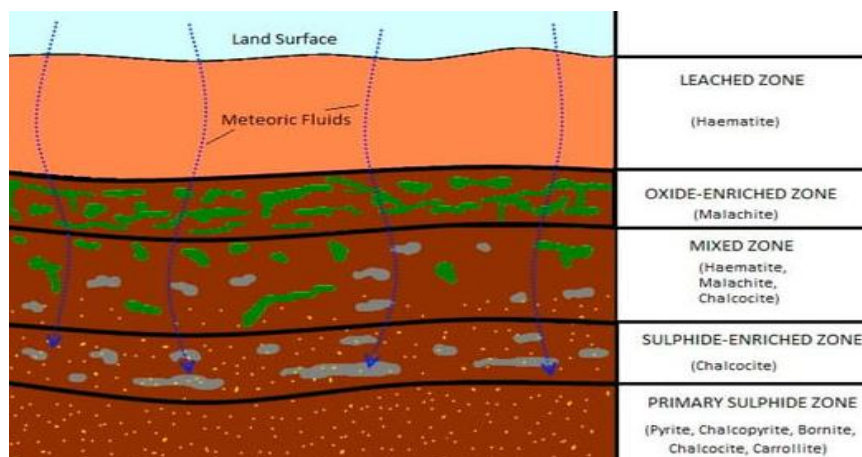


Рис. 3. Зональность гипергенной минерализации: зоны изменений и преобладающая минералогия руд.

Процесс обогащения минерализацией гипергенных соединений инициируется реакцией гипогенных сульфидных минералов с очень низкой соленостью и метеоритных флюидов с высоким содержанием кислорода при низкой температуре ($<30^{\circ}\text{C}$). При растворении атмосферного диоксида углерода в дождевой воде образуется разбавленная уголекислота, которая вступает в реакцию с пиритом и сульфидами Cu–Co. Реакция повышает кислотность метеоритной жидкости и улучшает ее способность вызывать дополнительные гипергенные изменения. Выпадение гипергенных руд в первую очередь контролируется значительным падением окислительно-восстановительного потенциала (Eh), которое часто происходит поверх слабо насыщенных кислородом грунтовых вод. Таким образом, зона оксидных руд обычно находится в основании вадозной (ненасыщенной) зоны. Переходная/смешанная зона находится между ними и обычно связана с колебаниями уровня грунтовых вод. Однако современный уровень грунтовых вод может не соответствовать положению палеофреатических зон, которые существовали во время формирования этих супергенных рудных тел.

2.4. Геохимический контроль поведения металлов в системах наземных растений.

Основные биотические и абиотические процессы, которые влияют на поведение металлов в почвенно-растительных системах, показаны на рисунке 4. Почвы являются геохимическим поглотителем микроэлементов, а ионы металлов вступают в ряд реакций как в твёрдой, так и в водной среде, которые варьируются в пространственно-временных масштабах. Таким образом, химический состав почвы динамичен и зависит от многофазного равновесия, включающего: (а) твёрдую фазу, то есть филлосиликаты, в том числе глинистые минералы, такие как каолинит, иллит, смектит и т. д., и гидратированные оксиды, в том числе гидратированные оксиды марганца, железа и алюминия, а также твёрдое органическое вещество; водную фазу, состоящую из воды и растворённых компонентов, таких как свободные ионы металлов, комплексные ионы, растворённый органический углерод и другие лиганды.

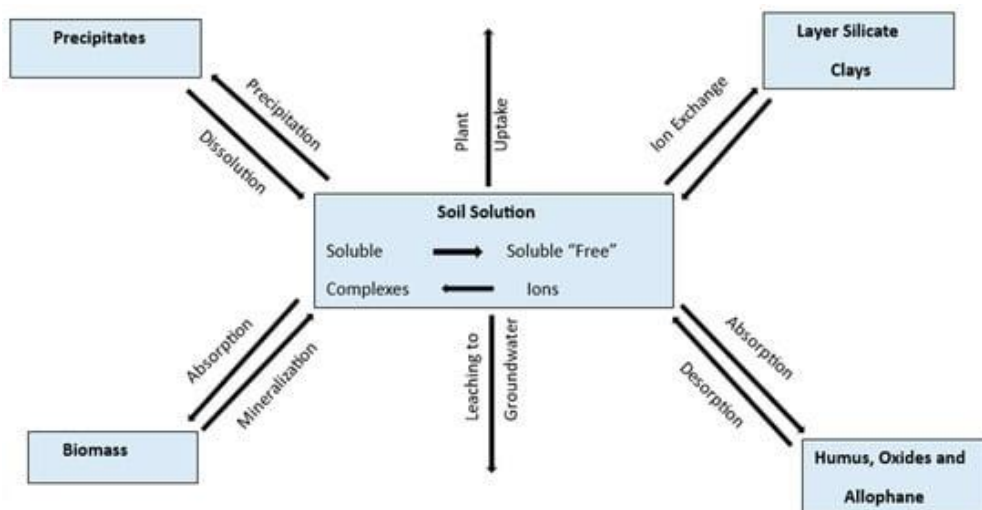


Рис. 4. Взаимодействия в почвенно-растительных системах, влияющие на распределение микроэлементов.

Из рисунка 4 видно, что основные процессы, определяющие поведение металлов в системах почва–растения, включают ионный обмен (адсорбция-десорбция), солюбилизацию (выпадение в осадок-растворение) и абсорбцию (ассимиляцию или иммобилизацию) живой биомассой. Микроорганизмы и корни растений взаимодействуют с растворенными в почве видами, а микробный и корневой экссудат может влиять на растворимость и конечный перенос образующихся соединений. По сути, эти процессы сильно влияют на биогеохимическое формирование элементов и контролируют их растворимость, подвижность, биодоступность и обогащение металлами растений. Кроме того, биогеохимические процессы зависят от нескольких основных переменных, таких как pH, Eh и емкость катионного обмена (СЕС), и они играют ключевую роль в подвижности и биоаккумуляции элементов в растениях. Однако это не исключительные переменные, поскольку существуют и другие био-геохимические факторы и факторы окружающей среды, которые могут влиять на фитогеохимические процессы, подвижность элементов и биоаккумуляцию.

Как правило, способность почв удерживать микроэлементы увеличивается с повышением pH. Биодоступность Cu, Co, Zn, Ni и Pb значительно снижается в щелочных почвах. Таким образом, кислые почвы способствуют поглощению металлов растениями, и содержание металлов в надземных частях растений может быть значительно выше нормы. pH является одним из основных факторов, определяющих биогеохимические процессы, поскольку он может влиять на поверхностный заряд силикатных глин, органического вещества и оксидов железа, марганца и алюминия. Помимо влияния на сорбцию катионов и комплексообразование с органическим веществом, он также влияет на реакции осаждения-растворения, окислительно-восстановительные реакции, подвижность, вымывание и дисперсию коллоидов. В то время как pH почвы является наиболее важным или определяющим фактором, влияющим на доступность

металлов в почвенно-растительных системах, другие факторы, такие как СЕС и Eh, также могут влиять на растворимость, подвижность и биодоступность. Восстановительные условия, характеризующиеся значительным падением Eh и низким pH, приводят к образованию сульфидов металлов, но они совершенно нерастворимы, так что подвижность и биодоступность металлов значительно ниже, чем можно было бы ожидать в окисленных почвах. Таким образом, степень окисления и химические соединения влияют на реакционную способность и подвижность металлов в окружающей среде.

Кроме того, на фитогеохимическое поведение металлов влияют и другие физико-химические свойства элементов, в том числе электроотрицательность и ионный потенциал. Например, электроотрицательность влияет на порядок, в котором микроэлементы поглощаются компонентами почвы. Поэтому более электроотрицательные металлы образуют более прочные ковалентные связи с атомами кислорода. Для некоторых двухвалентных металлов установлено, что предпочтение связывания, основанное на электроотрицательности, составляет: $Cu > Ni > Co > Pb > Cd > Zn > Mg > Sr$. Однако эта картина может отличаться из-за ионного потенциала (отношения заряд/радиус), который влияет на прочность связи, и, таким образом, предпочтительным связыванием будет $Ni > Mg > Cu > Co > Zn > Cd > Sr > Pb$. По сути, химическая форма нахождения металла играет важную роль в оценке его подвижности, биодоступности и потенциального поглощения наземными растениями. Влияние различных геохимических факторов на подвижность и биодоступность микроэлементов, включая медь и кобальт, представлено в таблице 1.

Табл. 1.

Влияние почвенных факторов на подвижность и биодоступность микроэлементов.

Soil Factor	Causal Process	Effect on Mobility/Bioavailability
Low pH	Decreasing sorption of cations onto oxides of Fe and Mn	Increase
	Increasing sorption of anions onto oxides of Fe and Mn	Decrease
High pH	Increasing precipitation of cations as carbonates and hydroxides	Decrease
	Increasing sorption of cations onto oxides of Fe and Mn	Decrease
	Increasing complexation of certain cations by dissolved ligands	Increase
	Increasing sorption of cations onto (solid) humus material	Decrease
	Decreasing sorption of anions	Increase
High clay content	Increasing ion exchange for trace cations (at all pH)	Decrease
High OM (solid)	Increasing sorption of cations onto humus material	Decrease
Competing ions	Increasing competition for sorption sites	Increase
Dissolved inorganic ligands	Increasing trace metal solubility	Increase
Dissolved organic ligands	Increasing trace metal solubility	Increase
Fe and Mn oxides	Increasing sorption of trace cations with increasing pH	Decrease
	Increasing sorption of trace anions with decreasing pH	Decrease
Low redox	Decreasing solubility at low redox potential as metal sulfides	Decrease

Помимо влияния выделенных геохимических переменных на поведение металлов в наземных растительных системах, на подвижность и биодоступность микроэлементов могут также влиять условия окружающей среды и ландшафта. Так топография существенно влияет на развитие аномалий металлов в почве из-за её воздействия на поток грунтовых вод, богатых металлами, из минерализованных зон. Это может быть связано с тем, что уклон уровня грунтовых вод и последующий поток грунтовых вод обычно отражают уклон поверхности. Однако в непосредственной близости от водоразделов на движение грунтовых вод могут влиять и другие факторы, в том числе колебания уровня грунтовых вод в соседних бассейнах. В районах с низким рельефом, подверженных длительной эрозии, таких как ZCB, это может приводить к эпизодическому перемещению грунтовых вод, богатых металлами, независимо от рельефа местности. Базовые геохимические исследования почв в ЦАМП показывают, что аномальные концентрации металлов в свободно дренируемых почвенных горизонтах над максимальным уровнем грунтовых вод переносятся растительностью из более глубоких горизонтов.

О биодоступности металлов в растениях свидетельствует их растворимая фракция, несмотря на растущее понимание того, что существующие методы оценки растворимых и биодоступных фракций нуждаются в переоценке из-за их изменчивости в пространственно-временных масштабах. Химические методы экстракции остаются наиболее часто используемыми методами оценки биодоступной фракции металлов. Растворимое содержание металла и «слабо адсорбированное» содержание (т.е. обменное) являются хорошим показателем количества металла, доступного для растений. Отдельные экстрагенты, включая CaCl_2 и $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, часто используются для извлечения обменных металлов из почвы, и эта обменная фракция может тесно коррелировать с поглощением растениями.

2.5. Геохимия растительности в качестве среды для пробоотбора.

Растения поглощают и перерабатывают широкий спектр элементов из грунтовых вод или минеральных поверхностей, накапливая одни элементы и исключая другие. Биологически важные элементы (P, Ca, K, Mg, Na, S, Cu, Fe, Mo, Se и Zn) избирательно поглощаются растительностью. Полезные и второстепенные элементы, в том числе потенциально токсичные, также поглощаются и могут отражать состав почвы и реголита. Медь является важным микроэлементом для растений, входящим в состав белков ряда ферментов, которые отвечают за перенос электронов и окислительно-восстановительные реакции в растительных органеллах, включая митохондрии, хлоропласты, клеточные стенки и цитоплазму растительных клеток. Белки, содержащие медь, также играют важную роль в метаболизме углеводов и азота, а также в лигнификации клеточных стенок. Растения обычно поглощают медь из почвы в форме Cu^{2+} ,

так как она легко связывается с органическими веществами по сравнению с другими соединениями меди. Поскольку медь является питательным веществом для растений, её содержание в большинстве растений, как правило, регулируется изнутри, а не извне. Таким образом, концентрация меди в большинстве растений ниже, чем в почве, в которой они растут (табл. 2), за исключением тех, которые произрастают на минерализованных участках.

Табл. 2.

Средние концентрации элементов (мгКг^{-1}) в горных породах, почвах и растительности.

	Co	Cr	Cu	Pb	Mn	Ni	Zn
Earth's crust	25	100	55	13	950	75	70
Granite	3	20	13	48	195	1	45
Basalt	47	114	110	8	1280	76	86
Ultramafic rocks	150	1600	10	1	1620	2000	50
Soils (non-ultramafic)	10	60	20	10	850	40	50
Soils (ultramafic)	250	2500	20	10	1000	2500	40
Vegetation (non-ultramafic)	1	1	10	10	80	2	100
Vegetation (ultramafic)	10	10	10	10	100	80	100

Концентрация Cu, необходимая для нормального роста растений, колеблется в пределах 5-20 мгКг^{-1} . Дефицит и токсичность могут рассматриваться как концентрации ниже или выше указанного диапазона. Однако верхние пороговые значения, свидетельствующие о значительной биоаккумуляции, могут варьироваться в зависимости от геологических условий и от концентрации Cu в почве. В минерализованных районах концентрация Cu в растениях значительно возрастает до такой степени, что растение может не переносить таких суровых эдафических условий. В отличие от Cu, концентрации Co в растениях, как правило, сильно коррелируют с химическим составом почвы, поскольку обычно он не рассматривается как необходимая пищевая потребность, хотя и может оказывать благотворное воздействие.

Флористический состав отражает доступность элементов в корнях и способность растения поглощать, переносить и накапливать элементы. Растения, устойчивые к повышенным концентрациям металлов, реагируют тремя механизмами, а именно; исключение, индикация и гипераккумуляция. Исключающие факторы ограничивают перенос металлов в надземную биомассу и поддерживают относительно низкие концентрации металлов в листьях в широком диапазоне концентраций металлов в почве. Индикаторные виды растений имеют тенденцию к перемещению и накоплению металлов в надземных органах растений. Концентрация металлов в этих растениях отражает химический состав почвы, а соотношение концентрации металлов в растениях и почве относительно постоянное и демонстрирует линейную зависимость. Гипераккумуляторы демонстрируют чрезмерное поглощение металлов и их транслокацию в побеги. Идентификация растений-эксклюзив, индикаторов и гипераккумуляторов обычно зависит от сравнения концентрации металла в растении с общей концентрацией металла в

почве. Концентрации Cu в растениях- индикаторах и гипераккумуляторах находятся в диапазоне 30-500 мгКг⁻¹, но это может варьироваться в зависимости от подстилающих пород и состава почвы.

Поглощение металлов растительностью может зависеть от элемента, вида растения и растительной ткани. Концентрации металлов в растениях обычно варьируются среди видов растений. Концентрация, перенос и накопление металлов из почвы в корни и побеги оцениваются на основе биологических коэффициентов концентрации (BCF). BCF рассчитывается как отношение содержания металлов в корнях растений к содержанию в почве и является полезным показателем потенциала фиторемедиации. Таким образом, поглощение металлов ограничено факторами биоконцентрации отобранных видов растений с использованием уравнения (1).

$$\text{Bioconcentration Factor(BCF)} = C_{\text{metal in plant}} / C_{\text{metal in soil}} \quad (1)$$

Коэффициенты биоконцентрации металлов - это индексы, которые используются для определения способности видов растений концентрировать интересующие металлы в почвах и подстилающих минерализованных породах. Виды растений с BCF > 1 могут быть растениями-аккумуляторами или гипераккумуляторами и могут указывать на потенциал минерализации. При поисках ПИ систематический отбор проб почвы и растительности остается важным для определения того, обусловлены ли факторы высокой биоконцентрации естественным обогащением металлами или просто следствием антропогенной деятельности.

В ЦАМП в ходе исследований было выявлено несколько видов индикаторов меди и кобальта. Несмотря на то, что в растениях были обнаружены металлы и их соединения, независимые геологические и фитогеохимические факторы, лежащие в основе взаимосвязи между видами растений и минерализованными участками, не были полностью описаны. Это открывает возможности для использования фитогеохимии в качестве потенциального метода поисков.

Отбор проб растений и почвы и их анализы.

Фитогеохимия при поисках зависит от взаимосвязи между растениями и почвой. Это связано с тем, что растения не могут получить доступ ко всему запасу металлов, имеющемуся в почве. Таким образом, для оценки геохимических форм меди и кобальта в ризосфере и их влияния на биодоступность металлов требуется систематический отбор проб растений и почвы. Фитодоступность металлов сильно зависит от вида растения и свойств почвы, которые контролируют подвижность и биодоступность металлов в почвенном растворе. Cu и Co имеют сильное сродство к почвам с глинистыми и органическими составляющими, поскольку они

снижают подвижность элементов. Cu в почвенном растворе также может находиться в соединении с другими лигандами, такими как NH_3 , $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$, SO_4^{2-} , OH^- , Cl^- . Распределение металлов в почвах также зависит от pH почвы. Изменения в распределении металлов считаются основным показателем изменения подвижности и биодоступности металлов в почвенно-растительных системах.

Таким образом, при фитогеохимических исследованиях систематически отбираются пробы как растений, так и почвы с использованием регулярной сетки. Подход, применяемый при отборе проб растительности, представляет собой квадратичный количественный экологический метод, в котором для деревьев, кустарников и травянистой растительности берутся квадраты разного размера, включая 100 м², 25 м² и 1 м² соответственно. У каждого из отобранных видов собраны различные органы растений, включая корни, стебли и листья. Пробы почв отбираются с использованием традиционного почвенного геохимического отбора проб, ориентированного на горизонт В. Кроме того, берутся пробы почв, извлеченных из корней растений, для определения потенциального обогащения металлами по сравнению с фоновыми концентрациями в почве.

Полевые образцы обычно анализируют на наличие различных физико-химических свойств, включая электропроводность почвы (ЕС), pH, общее содержание растворённых твёрдых веществ (TDS) и текстурные характеристики, то есть является ли почва песчаной, илистой или глинистой. Перед химическим элементным анализом образцы растений и почвы гомогенизируют. Растения измельчают до состояния золы, а почву просеивают до размера частиц 76 микрон, поскольку многоэлементный анализ таких мелких фракций может выявить важные геологические и геохимические процессы. Многоэлементный анализ почвы и растений проводится с помощью pXRF. Это позволяет быстро получать геохимические результаты, даже если концентрация некоторых микроэлементов в образцах очень низкая и находится за пределами обнаружения. Однако современные достижения в области аналитических технологий, в том числе атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС), микро-PIXE (спектроскопия рентгеновской флуоресценции, индуцированной частицами), сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионной спектрометрией (СЭМ-ЭДС), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), Quemscan и лазерная абляция минералов (ЛАМ), позволяют проводить элементный и минеральный анализ образцов почвы и растений. Эти современные приборы потенциально могут решать аналитические задачи, связанные с растительными тканями, которые, как правило, накапливают очень низкие концентрации химических элементов. Кроме того, исследования, проведённые на гербарных образцах *Haumaniastrum* в ЦАМП с использованием СЭМ-ИСП, позволяют успешно различать

виды Cu и Co, вызванные поверхностным загрязнением внутренних структур растений. Однако в этих исследованиях также отмечается отсутствие стандартных протоколов обеспечения и контроля качества при отборе проб растительности, а также сложности в анализе и интерпретации данных, полученных из собранных образцов.

3. Методы оценки использования растений для выявления месторождений.

Наиболее эффективный подход к оценке использования растений при поисках скрытых рудных месторождений зависит от использования нескольких инструментов оценки, которые могут быть сгруппированы в соответствии с геохимической оценкой и оценкой металлофитов, как показано на рисунке 5.

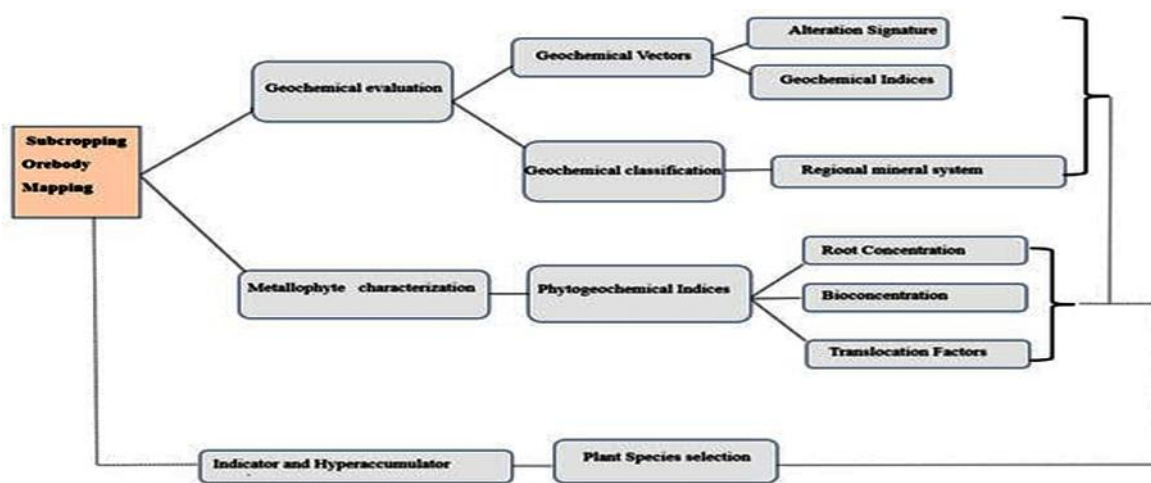


Рис. 5. Концептуальные основы использования растений при поисках месторождений.

Геохимическая оценка при поисках скрытых рудных месторождений фокусируется на выявлении химических градиентов, которые демонстрируют пространственную непрерывность и связаны с процессами изменений и минерализации. Интерпретация геохимических данных выявляет крупномасштабные закономерности, которые определяют направления геологических и геохимических процессов, которые, возможно, привели к сохранению рудного тела, включая зоны обогащения металлом и истощения. Эффективная и надежная интерпретация геохимических данных обычно выявляет линейные зависимости, которые могут отражать стехиометрию порообразующих минералов и последующие процессы, изменяющие структуру минералов, включая гидротермальные изменения, выветривание и взаимодействие флюида и породы.

Однако геологические и геохимические процессы регионального и локального масштаба также могут быть выявлены с помощью геохимических индексов. Эти индексы полезны для отличия отрицательных и несущественных аномалий от положительных аномалий, связанных с минерализованными зонами. Например, индексы отношения скандия к меди (Sc/Cu)

используются для нормализации геохимических данных и подтверждения нанесенных на карту аномальных объектов. Кроме того, типы рудных месторождений характеризуются уникальными скоплениями элементов, и, следовательно, ассоциации элементов, выявленные по геохимическим показателям, могут указывать на источники металлов и природу минерализующих флюидов. В геохимических исследованиях окружающей среды геохимические индексы включают индекс геонакопления (I_{geo}) и факторы загрязнения (CFS), и они сосредоточены на повышенных концентрациях металлов из антропогенных источников.

Однако обогащение почв и реголита металлами влияет на виды растений независимо от того, происходит ли это из-за естественных или антропогенных источников. Способность растений накапливать металлы из почвы можно количественно оценить с помощью коэффициентов накопления металлов. Коэффициенты переноса металлов определяются как отношение концентрации металлов в растении к их концентрации в почве. Такие фитогеохимические показатели позволяют оценить перемещение металлов из почвы в растения. На рисунке 5 приведены три фитогеохимических показателя, которые важны для характеристики металлофитов. Коэффициент концентрации в корнях (RCF) — это отношение концентрации металла в корнях к концентрации кислоторастворимых металлов в почве. Способность растения переносить металлы из корней в листву измеряется с помощью коэффициента переноса (TF), который представляет собой отношение концентрации металла в листве к концентрации металла в корнях. Растения, которые поглощают и накапливают металлы, как правило, имеют высокие значения RCF и TF. Металлофиты с высокими значениями RCF и TF полезны при поисках месторождений. Такие растения накапливают и переносят металлы из зон минерализации в свои корни, а затем в надземную биомассу. Выбор таких видов-аккумуляторов и гипераккумуляторов важен для поиска ПИ и может быть осуществлён путём сопоставления геохимических факторов с результирующими фитогеохимическими показателями.

3.1. Металлофиты ЦАМП.

В ходе исследований было выявлено несколько видов растений, демонстрирующих устойчивость к Cu и Co (табл. 3).

Среди них *Annona senegalensis*, *Aeolanthus biformifolius*, *Silene cobalticola*, *Ascolepis metallorum*, *Crotalaria cobalticola* и *Haumaniastrum*. Род *Haumaniastrum* включает несколько видов, которые обычно произрастают на почвах с повышенными концентрациями Cu и Co, при этом один вид (*H. robertii*) произрастает только на месторождениях меди как в Замбии, так и в Демократической Республике Конго. О виде *Haumaniastrum robertii* сообщалось как о гипераккумуляторе Cu–Co на основе невымытых полевых образцов листьев с аналитическими

результатами до 8500 мгКг⁻¹ Cu и 4000 мгКг⁻¹ Co. Однако такие повышенные концентрации также могут быть объяснены переносимой ветром пылью, содержащей медь и кобальт, из почв, богатых металлами. Другим видом рода *Haumaniastrum*, который продемонстрировал свойства гипераккумуляции, является *Haumaniastrum Katangese*, который накапливает меньше Co (до 864 мгКг⁻¹), но больше Cu по сравнению с *Haumaniastrum robertii*.

Табл. 3.

Виды растений-гипераккумуляторов Cu и Co в ЦАМП
(значения в мгКг⁻¹ сухой массы).

Species	Cu	Co
<i>Acalanthus bifurcatus</i>	3920	2820
<i>Annona senegalensis</i>	2889	2650
<i>Asclepias metallica</i>	1200	-
<i>Buchnera henrici</i>	3520	2435
<i>Bulbostylis mucronata</i>	7783	2130
<i>Becium homblei</i>	2051	-
<i>Crotalaria cobalticola</i>	-	3010
<i>Gutierrezia cupricola</i>	5095	2309
<i>Haumaniastrum Katangese</i>	8356	2240
<i>Haumaniastrum robertii</i>	8500	4000
<i>Haumaniastrum rosulatum</i>	1089	-
<i>Ipomoea alpina</i>	12,300	-
<i>Lupinus perennis</i>	9322	2300
<i>Rendlia cupricola</i>	1560	-
<i>Parinari curatellifolia</i>		

Экспериментальная работа дополнила некоторые полевые экологические исследования, в ходе которых растения двухмесячного возраста, собранные из семян, подвергались воздействию растворимых солей Cu и Co, смешанных с почвой, и использовались для имитации природных условий. Результаты этих экспериментов показывают, что *H. Robertii* может быть устойчив к концентрациям Cu и Co в почве до 8500 мгКг⁻¹ и 4000 мгКг⁻¹ соответственно. Другие купрофиты, которые, как известно, произрастают почти исключительно на богатых металлами почвах с повышенной концентрацией Cu, включают виды *Becium metallica* (Duvign), *Becium Homblei* (de Wild) и различные виды *Icomum*. Однако виды *H. robertii*, *H. Katangese* и *Becium Homblei*, вероятно, являются наиболее известными видами растений-индикаторов Cu–Co. Полевые экологические исследования вида *Becium Homblei* показывают, что он может быть устойчив к концентрациям Cu и Ni в почве до 15 000 мгКг⁻¹ и 5000 мгКг⁻¹ соответственно. Следовательно, *Becium Homblei*, представитель семейства губоцветных (Labiatae), обычно используется геологами Замбии в качестве геоботанического индикатора, хотя его фитогеохимическое значение остается неясным.

Хотя *Becium Homblei* был связан с повышенными концентрациями меди в почве и низкорослой растительностью, обычно называемыми “медными полянами” в Замбии, кампании геохимических исследований не были нацелены на отбор проб и анализ этих видов растений.

Были выделены *Annona senegalensis*, *Parinari curatellifolia* и *Dombeya rotundilifolia* как местные виды деревьев в ZCB, обладающие способностью накапливать Cu и Co в тканях своих побегов. Тем не менее, чтобы использовать фитогеохимию при поисках полезных ископаемых, должен быть четкий геохимический след растений, отражающий процессы рудообразования и возможное сохранение рудного тела, но информация о таких взаимосвязях, которая была бы полезна при применении фитогеохимии, в настоящее время ограничена.

3.2. Комплексные подходы к исследованию фитогеохимии.

Современные достижения в области дистанционного зондирования и методов машинного обучения предполагают многообещающие возможности для интеграции фитогеохимии в комплекс поисковых методов регионального и локального масштабов. Гиперспектральные данные локального и регионального масштаба могут обнаруживать спектральные изменения растительности, которые могут указывать на присутствие рудного месторождения и элементов-спутников. Гиперспектральное дистанционное зондирование измеряет излучаемую и поглощаемую энергию на сотнях узких и спектрально смежных длинах волн. Гиперспектральное дистанционное зондирование может охватывать различные оптические области, такие как видимая (VIS; 400-700 нм), ближняя инфракрасная (NIR; 700-1200 нм), коротковолновая инфракрасная (SWIR; 1000-2500 нм), средневолновая инфракрасная (MWIR; 3000-7000 нм) и длинноволновая инфракрасная (LWIR; 7000-13000 нм). Видимые области электромагнитного спектра позволяют обнаруживать и идентифицировать гидратированные минералы. Растительность обычно демонстрирует спектральный отклик благодаря сочетанию морфологических параметров, таких как структура растительного полога, площадь листьев и химические свойства, такие как содержание воды, хлорофилла, азота и следовых концентраций металлов. Микроэлементы даже при низких концентрациях все еще могут вызывать незначительные изменения спектральной характеристики растительности в областях VIS и SWIR электромагнитного спектра. Дистанционное зондирование обеспечивает экономичный и результативный подход к поискам, позволяющий полностью охватить земную поверхность в пространстве, однако его интеграция с фитогеохимией требует дополнительных переменных окружающей среды, включая типы почв, топографию, биотические и абиотические взаимодействия. Кроме того, следует рассмотреть исследования чувствительности, полученные с помощью дистанционного зондирования, чтобы понять недостатки и эффекты различных методов сбора и обработки данных.

Новые технологии, такие как машинное обучение (ML) и глубокое обучение (DL), привлекают всё больше внимания и совершают революцию в интеграции данных из различных источников в различных областях. Методы машинного обучения достигли существенных

результатов в регрессионной оценке биогеофизических параметров по данным дистанционного зондирования в локальном и региональном масштабах. Эти подходы делают акцент на пространственном прогнозировании и могут быть полезны при интеграции и применении фитогеохимии при поисках. Несколько алгоритмов машинного обучения, в том числе K-ближайших соседей (KNN), линейная регрессия (LR), случайный лес (RF), метод наименьших квадратов и оператор выбора (LASSO), метод опорных векторов (SVM), регрессия опорных векторов (SVR) и дерево решений (DT), использовались для моделирования фиторемедиации и прогнозирования биоаккумуляции тяжелых металлов в почвенно-растительных системах. Что касается геохимического моделирования, то большинство исследований были сосредоточены на моделировании накопления металлов в почвах или водоемах в сочетании с географической информацией и поведением адсорбции металлов на основе данных, извлеченных из литературы. Методы машинного обучения продемонстрировали высокую точность прогнозирования и могут быть полезны при интеграции фитогеохимических данных при поисках. Кроме того, методы глубокого обучения расширяют границы знаний, используя искусственные нейронные сети (ИНС), свёрточные нейронные сети (CNN) и свёрточную долговременную кратковременную память (Conv LSTM) для извлечения глубинных характеристик из сложных наборов данных из нескольких источников с помощью множественного обучения ядрам и, следовательно, обеспечивают более высокую точность и возможности прогнозирования.

Несмотря на преимущества ML и DL, по-прежнему необходимо решить ряд проблем для достижения наилучшей производительности и прогностической способности моделей, включая недостаточные или неподходящие выборки обучающих данных, расхождения в данных из-за различных экспериментальных методов и неправильного выбора входных переменных. Недостаточный ввод характеристик может привести к низкой точности прогнозирования и упустить важные факторы, которые имеют отношение к точному прогнозированию модели. Следовательно, при использовании алгоритмов ML и DL для пространственного прогнозирования накопления металла в растениях, связанных с рудными месторождениями, необходимо учитывать все переменные, влияющие на накопление металла в растениях.

4. Проблемы и возможности применения фитогеохимии.

Несмотря на узкие места в использовании фитогеохимии в ГРП в ЦАМП, несколько возможностей предоставляют достаточно возможностей для отбора проб видов растений для определения целей геохимических исследований в регионе. Далее приведены некоторые из существующих проблем и возможностей для выведения видов, специфичных для конкретного

участка, и видов-кандидатов, предназначенных для фитогеохимических исследований в Центрально-Африканском медно-кобальтовом поясе.

Проблемы:

(1) Отсутствие статистических и пространственных взаимосвязей между элементами-индикаторами и ориентирами на местности, где проводился отбор проб геохимических видов растений, поскольку большинство исследований характеризуют накопление металлов в растениях на основе одноэлементных концентраций, а не с учетом многоэлементного подхода. Однако идеальное растение, полезное в качестве индикаторного вида должно быть способно переносить и накапливать ряд металлов, поскольку вторичные геохимические проявления минеральных систем, включая содержания Cu-Co в отложениях, как правило, демонстрируют уникальные кластеры ассоциаций элементов. В настоящее время в ЦАМП не известно растений, соответствующих этим критериям.

(2) На содержание металлов в наземных растительных экосистемах влияют сложные взаимодействия между корнями растений и почвенными микробными сообществами в ризосфере. Эти взаимодействия и их влияние на доступность меди и кобальта для растений в настоящее время плохо изучены в ЦАМП и, следовательно, требуют передовых исследований с применением современных методов. Однако в некоторых горнодобывающих районах, в том числе в развивающихся странах, таких как Замбия и Демократическая Республика Конго, могут наблюдаться проблемы с ресурсами и инфраструктурой, что затрудняет сбор достоверных данных, обработку и обмен воспроизводимыми результатами исследований.

(3) Ограниченное количество междисциплинарных исследований, проводимых экспертами-геофизиками, геохимиками и систематиками растений, влияет на качество фитогеохимических данных. Сложность заключается в том, чтобы отличить естественное накопление от загрязнения, а также в точной идентификации видов растений, поскольку на одном участке исследования может произрастать несколько видов. Таким образом, становится сложно определить геохимический контраст, связанный с месторождением ПИ.

(4) Отсутствие четких протоколов обеспечения качества, включая использование стандартов и дубликатов, является еще одной серьезной проблемой, связанной с использованием геохимии наземных растений при разведке ПИ, поскольку в большинстве исследований прямо не указано, каким образом фитогеохимические данные проверялись на точность. Кроме того, способность определенных растений расти как на минерализованных, так и на неминерализованных участках затрудняет точный отбор дубликатов и таким образом, влияет на достоверность наборов данных по фитогеохимии.

(5) Фитогеохимию невозможно выполнить самостоятельно, поскольку на накопление металлов в растениях всегда влияют свойства почвы, включая растворимость и биодоступность металлов для усвоения растениями из почвы. Кроме того, при отборе проб растительности следует учитывать несколько факторов. К ним относятся распределение видов растений и пригодность структуры корней, различия в концентрациях элементов в различных органах растений, а также возраст и состояние здоровья отбираемого растения. Другим важным фактором является влияние сезонности на химические структуры, особенно на поглощение воды растениями, которые могут разбавлять определённые элементы в сезон дождей и концентрировать их в сухой сезон.

(6) Минералогия подстилающих пород может влиять на биодоступность Cu–Co для поглощения наземными растениями, поскольку богатые глиной породы, такие как сланцы и алевролиты, обладают более высокой способностью удерживать металлы по сравнению с кварцево-полевошпатовыми и карбонатными породами. Это может приводить к очень низким концентрациям микроэлементов в растениях и, следовательно, требует применения передовых аналитических технологий для выявления геохимических признаков в растениях, которые указывают на наличие ПИ.

Возможности:

(1) Большое разнообразие растительных сообществ и видовое богатство ЦАМП обусловлены его сложным и разнообразным геологическим строением. Это разнообразие и богатство растений может быть использовано при отборе видов-кандидатов, демонстрирующих устойчивость и накопление ряда элементов в их подземной и/или наземной биомассе при геохимических аномальных концентрациях.

(2) Распознавание растений, колонизирующих минерализованные участки и пустоши, образованные добычей полезных ископаемых, в ЦАМП, включая их анализ на накопление Cu–Co, представляет исходные данные, и, таким образом, фитогеохимия может использовать такие виды при моделировании геохимических закономерностей от заброшенных месторождений или известных минерализованных участков до новых участков, которые не пострадали от добычи полезных ископаемых.

(3) Успешное применение гипераккумуляторов для фиторемедиации открывает возможности для использования многоэлементной фитогеохимии при отборе видов растений-индикаторов в качестве переносчиков в минерализованные зоны.

(4) Современные достижения в области многомерного анализа биогеохимических данных и применение подходов, основанных на данных, таких как машинное обучение и алгоритмы

глубокого обучения, для прогнозного картирования и выбора видов-индикаторов, создают основу для повышения потенциала фитогеохимии при поисках.

(5) Использование междисциплинарных исследований, объединяющих биологическую, химическую и геологическую информацию, должно способствовать более широкому применению фитогеохимии при поисках полезных ископаемых.

5. Выводы и направления будущих исследований.

1. Разнообразное геологическое строение ЦАМП предполагает разнообразную литогеохимию и почвенную геохимию, которые в конечном итоге влияют на флористический состав региона. Это дает широкий выбор подходящих для конкретного участка видов растений, которые имеют специфические особенности реакции на определенные типы минерализации и накапливают ряд микроэлементов. Несмотря на высвобождение ряда микроэлементов и ионов металлов во время выветривания горных пород Катангана, их формирование в системах почва-растение обусловлено несколькими геохимическими процессами, включая ионный обмен (адсорбция-десорбция), солубилизацию и абсорбцию. На эти процессы влияют различные геохимические факторы, включая pH, Eh, органические вещества, способность к катионному обмену и оксиды Fe, Mn и Al. Эти геохимические факторы играют важную роль в контроле подвижности микроэлементов, их биодоступности и усвоения в системах почва-растения. Кроме того, другие физико-химические свойства элементов, такие как электроотрицательность и ионный потенциал, влияют на фитогеохимическое поведение металлов. Концентрация, перемещение и накопление микроэлементов из почвы в органы растений определяется количественно с использованием биологических коэффициентов концентрации, а виды растений с $BCF > 1$ являются гипераккумуляторами и были определены как потенциальные виды-индикаторы для фитогеохимических поисков рудных месторождений.

2. Фитогеохимия требует комплексного подхода при поисках из-за сложных биотических и абиотических взаимодействий в наземных растительных экосистемах. Новые технологии, такие как гиперспектральное дистанционное зондирование, машинное обучение и методы глубокого обучения, открывают несколько возможностей для интеграции фитогеохимии в комплекс методов ГРП. Эти подходы обеспечивают потенциальные преимущества с точки зрения интеграции данных из нескольких источников, точности и эффективности прогнозирования месторождений полезных ископаемых.

3. Поскольку стоимость ГРП растёт, а вероятность обнаружения скрытых рудных месторождений снижается, возникает острая необходимость в разработке новых эффективных и недорогих методов поисков. Фитогеохимия является одним из таких потенциальных методов.

Кроме того, во всём мире растёт интерес к малозатратным и экологичным технологиям, которые делают акцент на отборе образцов растений в качестве потенциального критерия для определения целей. Для оценки их полезности потребуются дополнительные исследования, направленные на выявление целевых видов и определение точных методов отбора образцов. Для оценки реальных перспектив фитогеохимии необходимы целенаправленные междисциплинарные исследовательские проекты, ориентированные на эти виды и объединяющие данные из разных источников.

4. Химический анализ видов металлофитов в ЦАМП указывает на их пригодность для фиторемедиации деградировавших ландшафтов и, следовательно, может быть полезен при поиске ПИ, хотя эти анализы ограничиваются определением содержания меди и кобальта. Таким образом, фитогеохимическая разведка должна перейти к многоэлементному и стабильному изотопному анализу растительных тканей, чтобы выявить минерализацию в пространственно-временных масштабах. Такие наборы данных по фитогеохимии позволят установить связи между геологическими и геохимическими переменными в минерализованных системах, а стабильные изотопы также могут служить индикаторами наблюдаемых концентраций металлов в растительной среде. Кроме того, анализ химических компонентов древесных колец может оказаться полезным для получения пространственно-временных геохимических данных, и эти наборы данных могут определять региональные и локальные геохимические пороговые значения и учитывать антропогенный вклад фоновых источников при интерпретации фитогеохимических данных при поисках скрытого оруденения. Кроме того, отсутствует согласованность в отношении типа (ов) органов растений, подлежащих отбору проб в ходе фитогеохимических исследований, поскольку в некоторых исследованиях отбирались пробы корней, стеблей и листьев, в то время как в других исследованиях отбирались пробы только листвы. Следовательно, необходимо определить рекомендации по отбору проб для эффективного применения фитогеохимии при поисках ПИ.

VII. ФИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ СКРЫТОГО W-Sn ОРУДЕНЕНИЯ (рудный район Шичжюань, Китай) [3].

1. Введение.

В рудном районе Шичжюань провинции Хунань были выбраны три доминирующих вида растений: *Artemisia argyi*, *Maesa japonica* и *Dicranopteris dichotoma* для анализа их характеристик поглощения и обогащения микроэлементами в различных частях растений. Для оценки эффективности этих растений в качестве индикаторов оруденения использовались многомерные статистические методы, включая кластерный анализ R-типа и факторный анализ. Целью исследования было определить наиболее подходящие растения-индикаторы, проверить применимость фитогеохимических методов и предложить новые подходы для поисков глубоко скрытых месторождений в районе Шичжюань и аналогичных регионах.

2. Материалы и методы.

2.1. Район исследований.

Почва на исследуемой территории представляет собой почву *in situ*, в основном состоящую из красной почвы, с pH от 4,6 до 6,8. Растительный покров превышает 95% площади, в основном включая семейство *Compositae*, за которым следует семейство *Pteridaceae*. В регионе произрастает множество однолетних, многолетних травянистых растений и кустарников. Ключевые местные виды растений включают *Artemisia argyi*, *Dicranopteris dichotoma*, *Cynodon dactylon*, *Pinus massoniana* и *Maesa japonica*. Установлено, что *A. Argyi* и *D. Dichotoma* обладают наибольшими способностями к поглощению и накоплению тяжелых металлов. Кроме того, *M. Japonica* наиболее широко распространен и имеет глубоко укоренившуюся систему. Эти три вида были использованы для отбора проб.

Геологические образования района Шичжюань преимущественно состоят из карбонатных пород верхнего девона и представлены известняками, микритовыми доломитами, доломитовыми известняками, а также конгломератами и песчаниками. Наиболее благоприятными рудовмещающими породами являются микритовые доломиты с вкраплениями глинистых полос. Ограниченное количество четвертичных отложений присутствует только в северной части района. Многочисленные NE-, NNE- и близкие к NS разломы определяют распределение гранитов и рудных тел (скарнов). Гранитный pluton Цяньлишань возрастом 160-153 млн лет, занимающий площадь около 10 км², играет доминирующую роль в выявленной рудной (W-Sn) минерализации преимущественно

скарнового и грейзенового типов, а также потенциального Cu, Pb, Zn и Ag гидротермального оруденения, возможно залегающего дистальнее от гранитоидов (рис. 1).

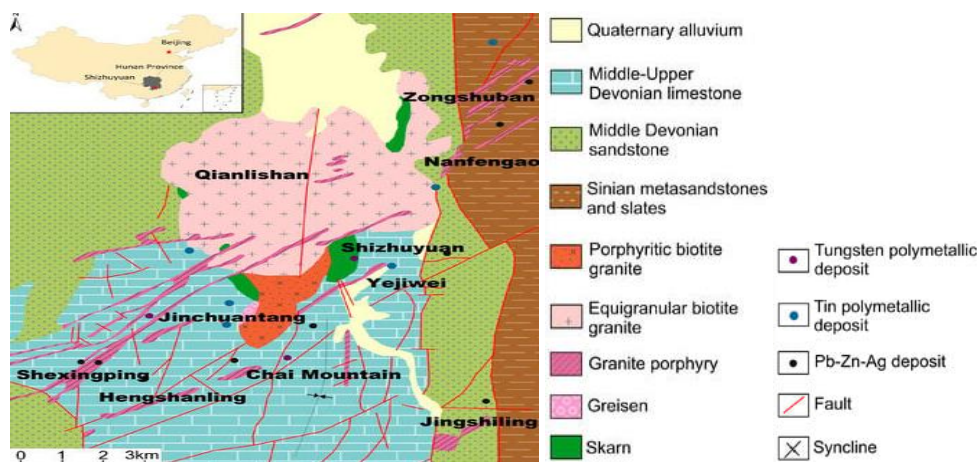


Рис. 1. Геологическая схема района Шичжуйюань.

2.2. Сбор, подготовка и анализ проб.

Точки отбора проб 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 км². 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 известного оруденения участке. Образцы сначала промыли и высушили при температуре 60°C. После этого их измельчили до размера частиц 0,2 мм.

Перед количественным анализом образцы обрабатывались методом мокрого разложения с использованием HNO₃-HClO₄. Примерно 0,2 г образца взвешивали и добавляли 10 мл смешанной кислоты (V(HNO₃): V(HClO₄) = 4:1), давали настояться в течение 30 мин, а затем ставили на горячую плиту при температуре 175°C пока не выделялось большое количество белого дыма и дигестат не становился прозрачным и бесцветным. После завершения сбраживания раствор дополнительно нагревали для выпаривания кислоты до тех пор, пока не оставалось 1-2 мл жидкости, а затем дигестату давали остыть до комнатной температуры. Затем дигестат переносили в мерную колбу объемом 25 мл, разбавляли до объема, тщательно перемешивали и оставляли настояться перед анализом. Исследованные микроэлементы включали 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 определялось отношением массы элемента к сухой массе растения (мкг/г). Анализ проводили с использованием масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) (серия Thermo X, Уолтем, Массачусетс, США).

2.3. Контроль и оценка качества, анализ данных.

В процессе случайным образом были взяты четыре национальных стандартных образца растений и четыре дублирующих образца для контроля качества анализа.

Точность проверялась с использованием формулы $\Delta \lg C_j - \Delta \lg C_s \leq \pm 0.13$, где C_j и C_s представляют среднее значение n измерений и стандартное значение национального стандартного образца соответственно. Относительное отклонение массовой доли элементов между двумя анализами одного и того же образца должно соответствовать стандарту $RD \leq 20\%$.

Результаты проверки качества показали, что контрольные образцы соответствовали критериям предварительного тестирования, при этом относительное отклонение (RD) повторных измерений того же образца составляло от 0,2% до 3,5%, что соответствует стандарту $RD \leq 20\%$, что указывает на достоверность результатов тестирования.

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

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

где $\omega_{\text{стебель/лист}}$ 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:

$$\begin{aligned} K_{CD} &= \frac{\omega_o}{\omega_b} \\ K_{NJ} &= \frac{\omega_o}{\omega_g} \\ C_v &= \frac{\sigma}{\omega_o} \end{aligned} \quad (2, 3, 4)$$

где ω_o - средняя концентрация элемента в образце растения, ω_b - средняя концентрация элемента в образцах растений контрольной зоны, σ - стандартное отклонение, а ω_g - глобальное эталонное значение для концентраций растительных элементов.

(3) Коэффициент биологического поглощения (X_{BAC}) для поглощения каждым элементом, поступающим в растение из почвы, выражается следующей формулой:

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

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

Элементы, активно или пассивно поглощаемые растением из окружающей среды, мигрируют и накапливаются в его различных частях. Из-за различий в элементной активности, способности к миграции и органоспецифической переносимости распределение одного и того же элемента в разных частях растений различно. Во время фитогеохимических исследований определение оптимального места отбора проб имеет решающее значение для повышения точности и эффективности. Были проанализированы средняя концентрация (ω_o) и коэффициент контрастности (K_{CD}) микроэлементов в тканях стеблей и листьев *A. argyi*, *M. Japonica* и *D. Dichotoma* из восьми участков в пределах исследуемой территории. Учитывая значительные различия в концентрациях 21 элемента, нормализация средних значений микроэлементов была необходима для простого построения графиков в программном обеспечении Origin 2022.

В *A. Argyi* значения ω_o 18 микроэлементов, за исключением Cd, Tl и Zn, были заметно выше в тканях листьев. В *M. Japonica* в тканях листьев значения ω_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 ω_o для Ag, As, B и 19 других микроэлементов (рис. 2). 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.

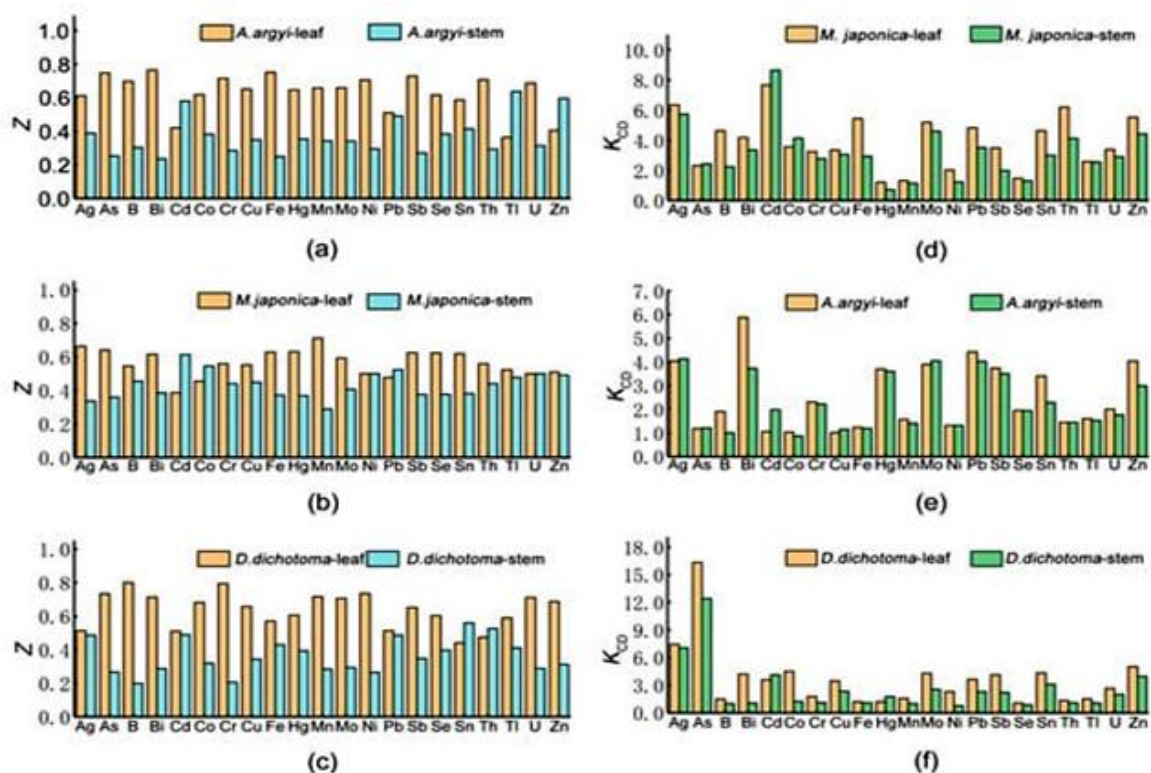


Рис. 2. Нормализованные значения (Z) микроэлементов в стеблевых и листовых частях *Artemisia argyi* (a), *Maesa japonica* (b) и *Dicranopteris dichotoma* (c) и коэффициенты контрастности отклонений (K_{CD}) микроэлементов в стеблях и листьях *Artemisia argyi* (d), *Maesa japonica* (e) и *Dicranopteris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

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.

При фитогеохимических поисках крайне важно выбирать растения с высокой способностью к обогащению целевыми элементами, поскольку эти растения обычно демонстрируют ярко выраженный контраст, эффективно отображая аномалии по сравнению с фоновыми уровнями. Коэффициент биологического поглощения (X_{BAC}) определяется как отношение концентрации элементов в листьях к концентрации в почве, что указывает на степень миграции элементов из почвы в растение. Этот коэффициент отражает способность или склонность растения поглощать и накапливать определенные элементы. Во время роста

растения в основном поглощают и используют элементы из почвы в их биодоступных формах. Таким образом, коэффициент переноса растений, рассчитанный с использованием биодоступных фракций элементов в почве, отражает способность или тенденцию растения более эффективно поглощать и накапливать определенные элементы. Значение X_{BAC} для микроэлементов растений было рассчитано с использованием данных фракционирования почвы, собранных и протестированных в том же месте, результаты представлены в таблице 1.

Табл. 1.

Значения X_{BAC} микроэлементов в различных растениях в районе Шичжюань.

Element	Plants (N = 20)	X_{BAC}	σ	Element	Plants (N = 20)	X_{BAC}	σ
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				

* The values in parentheses are the average.

В районе исследования три растения продемонстрировали высокую способность поглощать и накапливать биодоступные фракции металлических элементов (Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi) в почве, при этом их средние значения X_{BAC} превышали 5. И наоборот, эти растения показали минимальное поглощение радиоактивных элементов (U, Th) из почвы, при средних значениях X_{BAC} ниже 1. Среди трех видов *A. Argyi* значительно поглощал и накапливал микроэлементы, такие как Cu, Zn, Mo и Cd, со средними значениями X_{BAC} 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_{BAC} 12,0, 54.2, 23.3, 2.9 и 83.9 соответственно (табл. 1). Напротив, *M. Japonica* обладал относительно более слабыми способностями к поглощению и накоплению этих микроэлементов. В целом, возможности по обогащению *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_{CD}) в одном и том же месте отбора проб. Как

правило, средняя концентрация (ω_o) служит приблизительным показателем степени обогащения растений микроэлементами, в то время как значения K_{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 В, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Sn, Th, U, Tl и Zn, при значениях ω_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 ω_o 0,180, 0,695 и 0,966 соответственно. *D. Dichotoma* имела самые высокие концентрации Ag, As, Mn и Pb со значениями ω_o 0,137, 86,12, 995,7 и 15,4 соответственно (табл. 2).

Табл. 2.

Концентрации микроэлементов (ω_o) и коэффициенты контрастности отклонений (K_{CD}) для разных растений в одинаковых точках отбора проб.

Element	Plants (N = 20)	ω_o ($\mu\text{g g}^{-1}$)	σ	K_{CD}	Element	Plants (N = 20)	ω_o ($\mu\text{g g}^{-1}$)	σ	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 (0.66)	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					

* The values in parentheses are the average.

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.

Геохимические аномалии в районе Шизуюань 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, и демонстрирует 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 элементов в растениях в качестве регионального фона, приблизительно отражает фон элементной минерализации; K_{CD} , основанный на средней концентрации элементов в растениях 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.

В образцах *D. Dichotoma* такие элементы, как Ag, As, Bi, Co, Hg, Mn, Mo, Pb, Sb, Se, Sn, Th и U, демонстрировали сильную минерализацию, 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. Результаты анализа приведены в таблице 3.

Табл. 3.

Геохимические параметры ключевых растений в районе Шичжюань.

Element (N = 42)	ω_o (ug/g)	ω_{max} (ug/g)	ω_{min} (ug/g)	σ	K_{NJ}	K_{CD}	C_v	ω_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 множества геологических процессов в одном регионе региональные геохимические данные обычно характеризуются многоэлементными или многовариантными характеристиками. Чтобы дифференцировать воздействие различных геологических процессов, обычно используют кластерный анализ R-типа и факторный анализ элементов R-типа для выяснения их взаимосвязей, закономерностей совместного залегания и характеристик региональной минерализации. На сегодняшний день исследований по применению факторного анализа R-типа и кластерного анализа R-типа к фитогеохимическим данным явно недостаточно.

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.

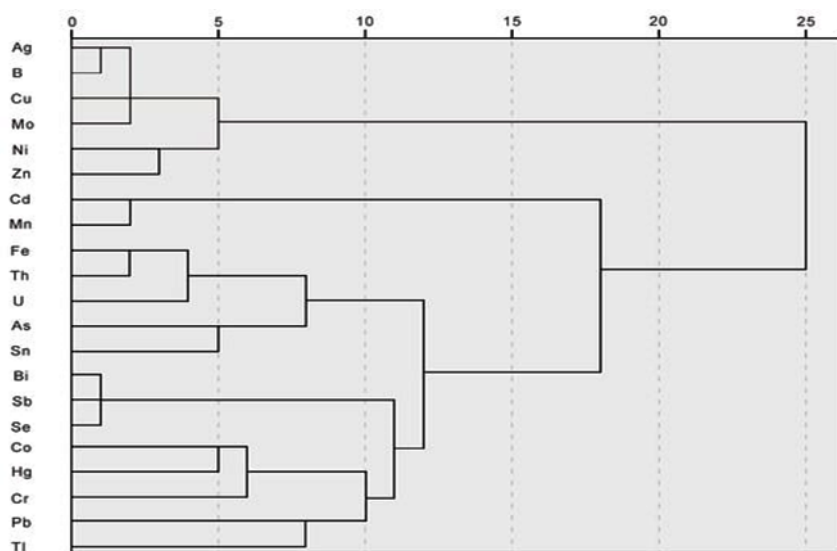


Рис. 3. Спектр кластерного анализа микроэлементов ключевого растения в районе Шичжюань.

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, содержащая металлические элементы Fe, Th, U, As и Sn, указывает на влияние средне- и высокотемпературных гидротермальных флюидов, при этом Sn демонстрирует большую пространственную независимость. Четвертая группа, включающая цветные металлы Bi, Sb и Se, демонстрирует сильное сродство к сере, легко образует ковалентные связи с ионами серы и демонстрирует тесные пространственные взаимосвязи. 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 различным элементным группам, демонстрируя сильную независимость. Это предполагает пространственное зонирование рудообразующих элементов на исследуемой территории.

3.2.2 Факторный анализ.

В этом исследовании использовался факторный анализ для изучения пространственных закономерностей распределения потенциальных минерализующих элементов на большей глубине. Согласно тесту Бартлетта на сферичность и критерию Кайзера–Мейера–Олкина (КМО), значение значимости (Sig), полученное в результате теста Бартлетта, составило 0,00, а индекс КМО достиг 0,788, что превышает рекомендованный Kaiser порог в 0,6. Эти результаты выявляют значительную взаимосвязь внутри набора данных, что делает его подходящим для факторного анализа. Были применены анализ основных компонентов и вращение varimax на

основе собственных значений >1 и коэффициента вклада кумулятивной дисперсии $> 81,366\%$. Коэффициенты были получены на основе факторных нагрузок, которые превышали абсолютное значение 0,6, что привело к четырем различным наборам факторов, как подробно описано в таблице 4.

Табл. 4.

Матрица нагрузки с коэффициентом ортогонального вращения микроэлементов доминирующего растения в районе Шичжюань.

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 вариации 31,819%, характеризующийся комбинацией низко-, средне- и высокотемпературных элементов, отражающих наложение множества гидротермальных событий. F2 представляет Cd–Cu–Ni–Zn с коэффициентом вариации 23,359%, идентифицированный как комбинация элементов с низкой и средней температурой, отражающая магма-гидротермальную активность, связанную с кислыми и умеренно кислыми интрузивными породами в регионе. F3 и F4 представляют Tl и Mo соответственно, с коэффициентами вариации 14,437% и 11,752% соответственно. Оба они являются независимо существующими высокотемпературными элементами, что дополнительно демонстрирует высокотемпературную гидротермальную минерализацию. Совпадение результатов кластерного анализа R-типа и факторного анализа подтверждает их согласованное происхождение.

4. Обсуждение.

4.1. Факторы, влияющие на содержание микроэлементов в растениях.

Части большинства растений можно разделить на корни, стебли, ветви, кору, листья и плоды, каждый из которых выполняет различные физиологические функции и демонстрирует

значительные различия в элементном составе и концентрации. Биогеохимическое исследование на месторождении Твин Лейкс с использованием коры, сучьев 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 сучьях и коре, в то время как B, K, Mg, Mn и P преимущественно содержатся в растениях. концентрируется в иглах. Эти различия отражают различную способность частей растений поглощать и концентрировать микроэлементы. В этом исследовании, как показано в таблице 3, концентрации Cu (4,2 ~ 22,7 мкг/г), Fe (74 ~ 254 мкг/г), Mn (56 ~ 2070 мкг/г), Mo (0,2 ~ 3 мкг/г) и Zn (22 ~ 97 мкг/г) в листьях *Dicranopteris dichotoma* были относительно высокими, вероятно, потому, что эти элементы являются необходимыми микроэлементами 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 Шичжюань реагирует на стресс, вызванный высокой концентрацией металлов в почве, горных породах или грунтовых водах, что приводит к обогащению полиметаллами. pH почвы является ключевым фактором, влияющим на биодоступность микроэлементов. В почвах с низким pH большое количество ионов водорода способствует высвобождению ионов микроэлементов с гидроксильных поверхностей глинистых минералов, повышая их концентрацию и активность, что способствует их накоплению в растениях. Исследуемая территория в этом исследовании характеризуется кислыми почвами с диапазоном pH от 4,6 до 6,8, что может частично объяснить легкость, с которой растения накапливают микроэлементы.

4.2. Результаты на основе выявленного оруденения и геологических данных.

Благодаря анализу микроэлементов в трех доминирующих видах растений листья *Dicranopteris dichotoma* были идентифицированы как ключевое растение-индикатор. Это исследование подтвердило достоверность результатов с помощью различных аналитических методов. Ag, As, Bi, Cd, Pb, Mo, Sn, Ti, U и Zn показали четкие закономерности обогащения и геохимические аномалии в образцах растений, со значениями K_{NJ} выше 5 и K_{CD} выше 2, а все значения C_v превышали 1. Характеристики геохимической аномалии W–Sn месторождения Шичжюань выявили минерализующие элементы, такие как W, Sn, Mo, Bi, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Sb, Ag и Au. По сравнению с известными характеристиками распределения минерализующих

элементов, *Dicranopteris dichotoma* демонстрирует значительные геохимические аномалии для таких элементов, как Ag, As, Bi, Mo, Ni, Pb, Sb, Se и Sn. В сочетании с результатами кластерного анализа R-типа и факторного анализа система минерализации в исследуемом районе 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 исследуемом районе ещё больше подчёркивают сложность минерализующей среды и потенциальных рудных объектов. Эти результаты в совокупности подтверждают эффективность *Dicranopteris dichotoma* в качестве индикаторного растения для поисков.

4.3. Ограничения и перспективы.

Хотя это исследование демонстрирует потенциал фитогеохимических методов для исследования глубоко скрытых рудных тел, остаются некоторые ограничения. Несмотря на обширные усилия по биогеохимическим исследованиям во всем мире, процессы, посредством которых минерализующие элементы диффундируют из скрытых рудных объектов, мигрируют на поверхность и поглощаются, транспортируются и накапливаются растениями в их различных частях, все еще очень сложны и недостаточно изучены. Будущие исследования должны быть в большей степени сосредоточены на механизмах обогащения растений различными микроэлементами для повышения точности и достоверности данных.

5. Выводы.

1. В исследовании изучались геохимические характеристики микроэлементов у доминирующих видов растений в рудном районе Шичжюань. Образцы растений демонстрировали благоприятный фон минерализации, геохимические аномалии и закономерности дифференциации, тем самым доказывая целесообразность использования фитогеохимических методов при поисках скрытых рудных месторождений.

2. При анализе средней концентрации сухого веса (ω_o) и коэффициента контрастности (K_{CD}) в стеблях и листьях трех местных доминирующих видов растений — *Artemisia argyi*, *Maesa japonica* и *Dicranopteris dichotoma* — было обнаружено, что листья не только обладают большей способностью к обогащению микроэлементами, но и демонстрируют более четкие геохимические характеристики. Таким образом, листья определены как оптимальные части растений отбора проб для изучения фитогеохимических характеристик.

3. Коэффициент поглощения ($X_{\text{ВАС}}$) биодоступных металлических элементов в почве и коэффициент контрастности (K_{CD}) относительно фоновой территории показали, что *D. Dichotoma* демонстрирует более выраженные геохимические аномалии для потенциальных минерализующих элементов (Ag, As, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn) в пределах исследуемой территории. Это указывает на то, что *D. Dichotoma* особенно хорошо подходит в качестве растения-индикатора для поисков 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 возможности для выявления скрытого оруденения в схожих геологических условиях и создают важную основу для будущих исследований и прогнозирования минеральных ресурсов.

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

VIII. ПОИСК СКРЫТЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОГАЗА (*Kumai*) [5].

1. Введение.

Китайские исследователи добились значительного прогресса в исследованиях, разработках технических устройств, экспериментального моделирования и полевых применений метода поисков скрытых рудных месторождений с использованием геогаза. Было реализовано шесть тем исследований, а именно: (1) состав, скорость потока и структура распределения геогаза и его взаимосвязь с неоднородностью земной коры и мантии; (2) сезонные изменения геогаза; (3) применимость поиска металлов с использованием геогаза в различных климатических, географических и геологических условиях; (4) миграция наноразмерных частиц субмикронного масштаба, переносимые геогазом, и преобразование частиц в различные активные состояния в сверхгенных средах; (5) обнаружение скрытых рудных месторождений с помощью тактической разведки металлов с использованием геогаза; и (6) метод анализа геогаза. Пункты (1), (2) и (4) являются частью изучения микроскопического механизма поиска металлов с использованием геогаза, а пункты (3), (5) и (6) помогают в применении поиска металлов с использованием геогаза. В этом материале основное внимание уделяется пунктам (3) - (5).

2. Концепция и принципы поисков металлов с использованием геогаза.

Поиск скрытых рудных месторождений с использованием геогаза основан на исследовании аномалий Rn. Концентрация радона в почвенном газе у поверхности является показателем скрытой минерализации урана на глубинах, равных или более 100 м. Период полураспада Rn составляет 3,8 дня, что предполагает наличие более мощного и быстрого транспортного механизма для подъема Rn на поверхность вместо традиционной диффузии. Было продемонстрировано наличие микропотоков геогаза в скважинах. Скорости потока варьировались от 60×10^{-4} до $4 \text{ см}^3/\text{мин м}^2$ в горизонтально спроектированных участках скважин. Микроэлементы в геогазе были дополнительно изучены, и результаты показали, что элементы, переносимые потоком пузырьков газа, могут быть потенциальным методом поиска скрытой минерализации. На основе этих исследований была предложена гипотеза поиска скрытых рудных месторождений с использованием геогаза: связанные с рудой элементы и элементы-следопыты в скрытых рудных телах были вынесены на поверхность, образовав геохимические аномалии, посредством восходящего микропотока пузырьков газа. Геохимические аномалии являются индикаторами геохимических поисков скрытых

месторождений. Тематические исследования в первую очередь подтвердили эффективность поиска скрытых рудных месторождений с использованием геогаза. Исследования включали аномалии Au и As непосредственно над массивной сульфидной рудой, аномалии Ni над Cu–Ni минерализацией, покрытой ледниковым слоем толщиной 1-2 м, аномалии Cu и Zn над месторождением золота Голден Кросс, покрытым примерно 100 м андезита, и аномалии Ni над массивными сульфидными рудными телами на глубине примерно 1000 м. Была предложена геохимия глубокого проникновения для объяснения геохимических аномалий в поверхностных средах над скрытыми рудными телами на глубине нескольких сотен метров. Была предложена концепция ультрадисперсного золота и пришли к выводу, что значительное количество Au существует в виде ультрадисперсных частиц в различных средах (горные породы, речные отложения и почвы). Был предложен метод с использованием геогаза (NAMEG) для разведки глубоко скрытых рудных тел в вскрышных породах, а именно ультратонкие или наноразмерные рудные элементы и элементы-следопыты переносятся восходящим потоком газа из глубин Земли на поверхность, образуя геохимические аномалии над скрытыми рудными месторождениями. Многие исследования непосредственно обнаружили наноразмерные металлы в геогазе, что убедительно подтверждает гипотезу NAMEG.

Геогаз широко распространен в природе, а источники включают дегазацию магмы, вулканическую дегазацию, метаморфическую дегазацию, термическое растрескивание органического вещества, микробный метаболизм, супергенное выветривание и барометрическая перекачка атмосферных газов.

Отбор проб среды для поиска металлов с использованием геогаза показывает сильную связь между составом геогаза и атмосферой. Было подтверждено наличие микропотоков восходящего газа, который включал N₂, O₂, Ar и CH₄, что указывает на частично атмосферный и вторичный источники. Как глубинная дегазация, так и газы, получаемые из рудных месторождений, являются потенциальными источниками геогаза. Основой газогеохимических исследований скрытых рудных месторождений является наличие связанных с рудой газогеохимических аномалий, таких как CO₂, Hg, Ar, H₂S, SO₂ и CH₄, над скрытыми рудными месторождениями и других газогеохимических аномалий над скрытыми сульфидными минерализациями, аномалии Rn и He над скрытыми залежами урана, а также аномалии углеводородного газа и He над залежами нефти и газа.

Влияние различных источников газов на поиск металлов с использованием геогаза требует дальнейшего разъяснения. Возможны три сценария: (1) для обнаружения скрытых рудных месторождений достаточно как газогеохимических поисков, так и поиска металлов с использованием геогаза, если газы, выделяемые скрытыми рудными месторождениями,

преобладают в геогазе; (2) поиск металлов с использованием геогаза может быть обнаружен только с помощью геогазовых поисков руд, если глубинная дегазация и газы, выделяемые скрытыми рудными месторождениями, незначительны; или (3) газы, происходящие из скрытых рудных месторождений, в результате интенсивной глубинной дегазации, а не залежей руды, потоки текут через скрытые рудные тела и выносят некоторые металлы, связанные с рудой, на поверхность.

2.1. Состав и морфология наноразмерных металлов в геогазе.

Характеристики NAMEG, включая размер, форму, компонент, структуру и генезис полимеризации показаны в таблице 1. Как правило, характеристики наночастиц следующие: (1) большинство отдельных наночастиц имеют форму гранул, неправильных многоугольников, овальной или почти сферической формы, размер которых варьируется от нескольких нанометров до сотен нанометров; (2) несколько отдельных наночастиц могут объединяться в кластероподобные агрегаты, а агрегаты частиц имеют эллиптическую, шаровидную, цепную или неправильную форму, размер которых варьируется от десятков до сотен нанометров; (3) некоторые наночастицы имеют кристаллическую внешность и упорядоченную кристаллическую структуру; и (4) отдельные наночастицы состоят из одного компонента или представляют собой многокомпонентные сплавы. Примечательно, что состав большинства наночастиц очень сложный, включающий рудообразующие элементы, сопутствующие элементы и другие элементы (например, Si, O).

Также были проведены подробные исследования окислительно-восстановительного состояния NAMEG, и результаты показывают присутствие наночастиц с высокой валентностью окисления в геогазе над месторождениями сульфидов. Примеры включают наночастицы с высоким содержанием кислорода и низким содержанием серы в геогазе над свинцово-цинковым месторождением Байрендаба, частицы Fe, Co и S-оксидов (гематит и SO₃) в геогазе над Цинминшаньским м-нием Cu–Ni, а также частицы оксидов железа и меди в геогазе над Дахэйшаньским базальто-медным м-нием. Названия наночастиц тесно связаны с супергенезом; то есть названия наночастиц могут быть продуктом выветривания или, вероятно, были преобразованы в результате супергенеза.

Статистические результаты показывают, что месторождения с большим количеством металлоносных наночастиц в основном включают месторождения Au, Cu (Ni) и Pb-Zn. Как правило, NAMEG над скрытыми рудными телами состоит из самородных металлов, сплавов, соединений металлов с Si, Al, Ca, O и P, оксидов и гидроксидов. NAMEG на разных типах месторождений имеет разный состав.

Характеристики связанных с рудой NAMEG рудных минералов в Китае
(n = от одного до девяти).

Deposit	Composition	Size (nm)	Morphology
Dongji Au deposit, Shandong	Si, Al, S, Ca, Fe, Mg, K, Cu	$n \times 10^2$	Amorphous and microcrystalline aggregates
Changkeng Au deposit, Guangdong	Au, Hg-S-O-Si-Cl-K, Pb-N-O-Sn, Pb-S-O-Fe, Zn-Sn-O-Si-Br-Fe	$n \times 10$ – $n \times 10^2$	Irregular, needle-shaped, or rhombic plate-shaped
Tongchanghe Cu mine, Guizhou	Cu, Cu-Fe, Cr-Fe-Cu	Individuals: 5–40; aggregations: 20–150	Individuals: subcircular, elliptical, polygonal, or elongate; aggregations: subcircular or elliptical
Fankou Pb-Zn deposit, Guangdong	Pb-(Mo/Cu), Zn-Sn-Cr, Zn-S-O, Pb-Zn-(Mo), Pb-Zn-Sb-As-Ge	10–300	Single particles: irregular, spherical, or trigonal plate-shaped; aggregations: globular, catenarian, or irregularly shaped
Zhou'an Cu-Ni deposit, Henna	Cu, Cu-Fe, Cu-Ti, Cu-Ag, Cu-Cr, Cu-Fe-Mn	$n \times 10^2$	Spherical, ellipsoid, grape-shaped, or polyhedral spheres; with a crystal appearance and an ordered crystal structure
Kaxiutata Fe deposit, Inner Mongolia	Fe, Cu, Zn, Bi, Mn, Pb	$n \times 10$ – $n \times 10^2$	Semi-oval, triangular, cloud-like, horsetail, elliptical, or irregular
Dongshengmiao polymetallic pyrite deposit, Inner Mongolia	S-(Cu/Zn/Pb/Mo), S-Fe-Zn-(Pb), S-Fe-Cu-(Mo), Cr-Mn-Fe	5–400	Sub-circular, elliptical, or irregular
	C-(Fe/Zn/Au/Cu/Pb)	$n \times 10$ – $n \times 10^2$	Sub-circular or ellipsoid
Jinwozi Au deposit, Xinjiang	Cu, Cu-Fe-Zn, Cu-Ti, Cu-Au	$n \times 10$ – $n \times 10^2$	Spherical, ellipsoid, grape-shaped, or polyhedral spheres; with a crystal appearance and an ordered crystal structure
Yueyang Ag-Au-Cu ore block, Fujian	Au, Cu, Au-Cu-Mo, Au-Cu, Cu-Co-Mo, Cu-Fe	$n \times 10^2$	Granular, spherical, polygonal spherical, or cluster-like aggregates; with a crystal appearance, and an ordered crystal structure
Kafang Cu deposit, Yunnan	Cu-Ag-Co-Fe, CuSO ₄ , WO ₃ , TiO ₂ , Pb and Fe oxides	20–300	Irregular, round, slab-flaky, or quadrilateral
Qingmingshan Cu-Ni sulfide deposit, Guangxi	Fe-Co-(Cu/Zn)	50–500	Nearly elliptical, nearly spherical, drop-shaped, or nearly rectangle
Bingba Cu deposit, Guizhou	Fe-Cu-Zn-(Mn/O/As), Zn-Fe-Kr-SiO ₂ , Pb-Kr-Zn-O	$n \times 10$	Chain-shaped, round, and irregular
Gongpoquan porphyry Cu deposit, Gansu	Pb, Cu, Pb-Zn, Cu-Fe-(Mn/Ti), Mn-Fe-Ti, Cu-Ti	$n \times 10$	Sphere, or polygonal granule; with an ordered structure
Shenjiayao Au deposit, Henna	Cu, Cu-Au-(Pb), Cu-Ti-Fe-Mo, Cu-Au-Ag-Mg-Fe-S	$n \times 10^2$	Sphere, oval, polygon, single pellets, chain, or irregular pellets; with an ordered internal structure
Baierdaba Pb-Zn deposit, Inner Mongolia	Cu, Pb, Cu-Si-O, Zn-Fe-O, Zn-Y-Na-S-O, Pb-K-Na-S-O	$n \times 10$ – $n \times 10^2$	Round, elliptic, ball-shaped, or flocculent shape

Наночастицы, содержащие медь, в изобилии присутствуют в геогазе над скрытыми месторождениями Cu-Ni, тогда как наночастицы, содержащие Au, в изобилии присутствуют в геогазе над скрытыми месторождениями Au (рис. 1 и 2).

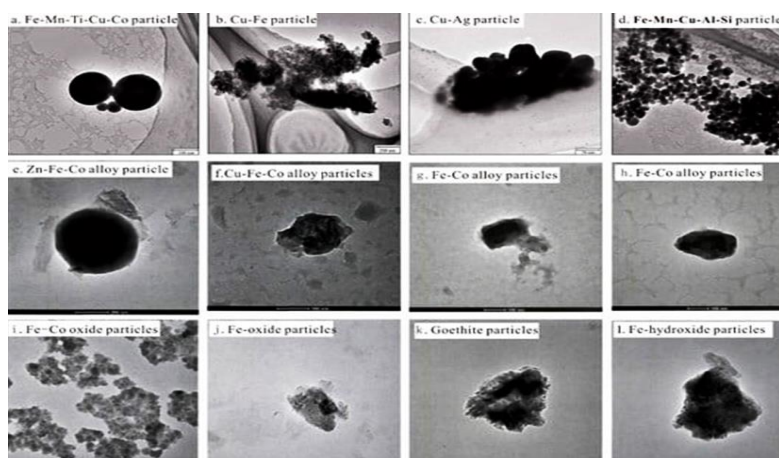


Рис. 1. Наноразмерные частицы в геогазе и почве над Чжоаньскими (a–d) и Цинминшаньскими (e–l) месторождениями сульфидов.

(a) наночастицы Fe-Mn-Ti-Cu-Co в геогазах; (b) наночастицы Cu-Fe в геогазах; (c) наночастицы Cu-Ag в почвах; (d) наночастицы Fe-Mn-Cu-Al-Si в почвах; (e) наночастицы Zn-Fe-Co в геогазах; (f) наночастицы Cu-Fe-Co в геогазах; (g) наночастицы Fe-Co в геогазах; (h) наночастицы Fe-Co в геогазах; (i) наночастицы железа и оксида Co в геогазах; (j) наночастицы оксидов Fe в геогазах; (k) наночастицы гетита в геогазах; и (l) наночастицы гидроксида Fe в геогазах.

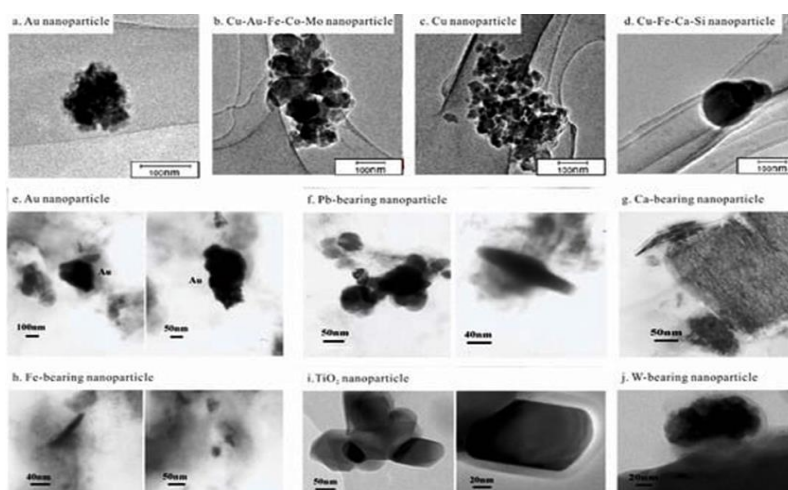


Рис. 2. Наноразмерные частицы в геогазе и почве над рудным блоком Юэян Ag-Au-Cu (a–d) и м-нием Чангкент Au (e–j).

(a) наночастицы Au в геогазе; (b) наночастицы Cu-Au-Fe-Co-Mo в геогазе; (c) скопление наночастиц Cu в почве; (d) наночастицы Cu-Fe-Ca-Si в почве; (e) наночастицы Au в геогазе; (f) сферические и округлые наночастицы, содержащие Pb, в геогазе; (g) скопление наночастиц, содержащих Ca в геогазе; (h) игольчатые и неправильные наночастицы, содержащие Fe в геогазе; (i) наночастицы TiO_2 в геогазе; и (j) Скопление W-несущих наночастиц в геогазе.

Даже в пределах одного и того же типа месторождения конкретный состав NAMEG также различается. Например, м-ния Cu-Ni Чжоуань и Цинминшань являются основными и ультраосновными месторождениями Cu-Ni. Названия сульфидных месторождений Чжоуань включают самородные сплавы Cu, Cu-Fe, Cu-Fe-Mn, Cu-Ag, Cu-Cr и Cu-Ni, а также соединения металлов с Si, Al, Ca, O и P (рис. 1a–d). М-ния Цинминшань включают сплавы Cu-Fe-Co, Zn-Fe-Co и Fe-Co, оксид (гидроксид) Fe-Co и Fe, а также другие оксидные частицы (например, оксид Si, карбонат кальция, гидроксид кальция и триоксид серы) (рис. 1e–l).

2.2. Источники наноразмерных металлов в геогазе (NAMEG).

Металлосодержащие наночастицы (НМГ) широко распространены в природе (например, рудные месторождения, окружающие породы, разломные выемки, реголит и геогаз). НМГ можно разделить на две категории. Первая - это НМГ, которые не имеют отношения к минерализации и появляются как в аномальных, так и в фоновых зонах. Эти наночастицы, в основном состоящие из Si, Ti, O и C, не имеют большого значения для геохимических исследований. Второе - это NAMEG, которые тесно связаны с минерализацией и предоставляют полезную информацию для поиска скрытых рудных месторождений; эти связанные с рудой наночастицы встречаются в более высоких концентрациях в геогазе над скрытыми рудными месторождениями, чем в фоновых районах, хотя общие концентрации NAMEG над скрытыми рудными месторождениями остаются низкими.

Еще одной серьезной проблемой при ГРП с использованием геогаза является определение того, что NAMEG получены из скрытых рудных месторождений, а не в результате выветривания окружающих пород или близлежащих выходов руды. В настоящее время доказательства того, что NAMEG происходят из скрытых рудных месторождений, в основном получены из изотопов, структуры редкоземельных элементов (РЗЭ), статистического и сравнительного анализа компонентов геогаза из фоновых и аномальных зон, а также геохимических компонентов скрытых рудных месторождений. Среди них статистические и сравнительные анализы их состава дают наилучшие доказательства; то есть в геогазе над скрытыми рудными месторождениями содержится больше рудообразующих и сопутствующих элементов, чем в геогазе из фоновых районов.

2.2.1. Сравнение состава.

В таблице 2 показаны полевые эксперименты и применения поиска металлов с использованием геогаза в Китае. Ключевые показатели включают ассоциацию элементов, глубину залегания скрытого рудного тела, метод отбора проб, глубину скважины и улавливающую среду.

Различные рудные месторождения характеризуются разными ассоциациями элементов. Эти характерные ассоциации элементов предполагают, что наночастицы, связанные с рудой, переносимые геогазом, могут проникать сквозь покровы и образовывать геохимические аномалии над скрытыми рудными месторождениями, хотя они могут трансформироваться и вмешиваться в них в результате гипергенных процессов.

Полевые применения метода NAMEG в Китае.

Deposit or Area	Element Association	Buried Depth (m)	Sampling Method	Hole (or Sampling) Depth (m)	Trapping Medium
Liaojie Au ore deposit, Yunnan	Zn, As, Sb, Cs, Cr, La, Sm, Sc, K, Au, Ag	50~200	SS		
Dongyi Au deposit, Shandong	Au, Cr, Zn, Sb, As, La, Sm, Na, Sc, Fe	~150; 200~400	SS	0.5~0.6	
Dayinggezhuang Au deposit, Shandong	Au, As, Sb, Hg, Bi, K	250~330	SS	0.6	Aqua regia and foam
Chaihulanzi Au deposit, Inner Mongolia	Au	75~100	AS	(0.5~0.7)	Foam plastic
Budunhua Cu deposit, Inner Mongolia	Cu, Au	430~530	AS	(0.5~0.7)	Foam plastic
Laoyanghao Au ore district, Inner Mongolia	Au, Ag, Cu, Pb, Ni	~100	AS	0.5~1.0	Foam plastic
Salbulack Au deposit, Xinjiang	Au, Sb, Zn, Fe, K, Sc		AS	0.4~0.5	
Mofancun prospecting area, Sichuan	Au, Sb, As, K, Al, Fe, La, Zn		AS	0.4~0.5	
Chaihuolanzhi Au deposit, Inner Mongolia	Au				
Tuanjie Au deposit, Heilongjiang	Au, As, Sb, La, Sm, Se		SS	0.4~0.5	Foam plastic
Gadaban district, Qinghai	Au, Ag, Cu, Zn, Ba, Sr		AS	(0.4)	Aqua regia, nitric acid, and foam plastic
Heihe Basin, Qinghai	Au, Ag, Cu, Pb, Zn		AS	0.4~0.8 (0.35)	Aqua regia and nitric acid
Beiqilian area (Pb-Zn ore body)	Au, Ba, Zn, Pb	150	AS	0.5~0.8	Aqua regia
Jiaolongzhang Pb-Zn deposit, Gansu	Cu, Pb, Zn, Cd, Ag, Bi, Ni, Sb, Tb, Tl, Yb	~100	AS	0.5~0.8; 0.6~1.0 (0.4~0.5)	Nitric acid
Lashuixia Cu-Ni deposit, Qinghai	Cu, Pb, Zn, Ag, Mn, Co		AS	0.5~0.8 (0.3~0.4)	Aqua regia

Глубина обнаружения при поиске металлов с использованием геогаза требует дальнейших исследований. В большинстве случаев глубина обнаружения составляет менее 500 м. Случаи, когда глубины скрытых рудных месторождений составляют >800 м, редки (например, м-ния Sn и Zn-Cu в Дачан). Известная максимальная глубина обнаружения при поиске скрытых рудных месторождений с использованием геогаза составляет приблизительно 1000 м для крупного месторождения сульфидной руды.

В ранних полевых экспериментах статический метод был основным при отборе проб и отнимал много времени. С разработкой устройств, в которые были встроены фильтрующие мембраны, отбор проб экономит время и является эффективным.

Улавливающая среда имеет решающее значение для успешного применения поиска металлов с использованием геогаза. Распространенные улавливающие среды включают царскую водку, азотную кислоту и пенопласт. Для получения адекватных результатов содержание целевых элементов в улавливающей среде должно быть незначительным или достаточно низким, чтобы оказывать минимальное влияние на результаты измерений при поиске металлов с использованием геогаза. Для разных месторождений требуются специальные улавливающие среды, поскольку улавливающая способность для разных элементов различна. Полевые эксперименты показывают, что способность царской водки улавливать Au, Ag, Cu, Zn и другие элементы лучше, чем у азотной кислоты, а пенопласт обладает определенными преимуществами в отношении адсорбции Au.

2.2.2. Морфология наноразмерного Au в геогазе.

В геогазе присутствует большое количество металлосодержащих наночастиц, и их морфология характерна и поучительна.

Различные наночастицы, содержащие Au, были обнаружены в рудах, мышьяковистом пирите, зонах разломов и др. (рис. 3).

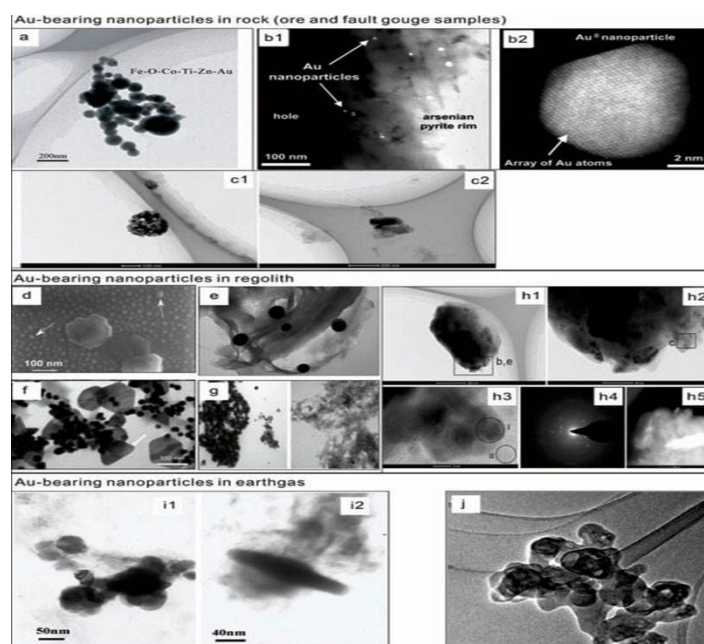


Рис. 3. Наночастицы, содержащие Au, в горных породах, реголите и геогазе:

(a) в руде м-ния Шангонг; (b1 b2) в мышьяковистом пирите; (c1 c2) в трещинах м-ния Шэньцзяо; (d) в трещине выветрившегося кварца; (e) в ультратонком участке осадка; (f) в результате воздействия дельфтибактина хлоридом Au(III); (g) образование микробными металлофорами; (h1-h5) в образце почвы над м-нием Шэньцзяо; (i1,i2) в геогазе над м-нием Чанкэн и (j) в геогазе над м-нием Шэньцзяо.

Было показано, что многочисленные наночастицы Au были рассеяны по всей матрице мышьяково-пирита, а отдельные наночастицы Au имели округлую форму и четко очерченные границы (рис. 3b1,b2)). Наблюдались нерегулярные частицы, содержащие Au, и скопление частиц, содержащих Au, примерно круглой формы в разломах золоторудного месторождения Шэньцзяо (рис. 3c1,c2)). Эти результаты подтверждают наличие большого количества

наночастиц, содержащих Au, в горных породах, которые могут быть потенциальным источником металлов в геогазе.

Наночастицы, содержащие Au, переносимые геогазом, можно разделить на две категории: те, которые образуются в результате гипергенных процессов (например, выветривания), и те, которые образуются непосредственно из скрытых рудных тел или первичных ореолов. Морфология бывших наночастиц, содержащих Au, как правило, отличается от морфологии эндогенных наночастиц (например, рудного тела и изменений). Исследования супергенных процессов показали, что микробные металлофоры могут приводить к образованию коллоидных, квазисферических, октаэдрических и бактериоформных наночастиц золота, которые в изобилии присутствуют в поверхностной среде (рис. 3d-g). Детальное исследование золотых зерен показало, что «вогнутости», составляющие 10-40% от общей площади поверхности зерен, содержат микроорганизмы и вторичные наночастицы Au, которые образуются микроорганизмами и встречаются в виде сфероидальных коллоидов и октаэдрических пластинок. Наночастицы Au могут дополнительно образовывать микрокристаллы, листовидный Au, разветвленные сети Au и наросты, а также вторичные каймы в ходе биогеохимического круговорота золота. Таким образом, содержащие Au наночастицы, полученные из скрытых рудных тел или первичных ореолов, отличаются от супергенных наночастиц, содержащих Au. Содержащие Au наночастицы, полученные непосредственно из скрытых рудных тел или первичных ореолов, имеют неправильную форму и кристаллическую природу (рис. 3h1–h5).

Содержащие Au наночастицы в геогазе представляют собой скопления неправильной формы, которые отличаются от содержащих Au наночастиц, образующихся в результате биогеохимических и химических процессов в супергенной среде. Это различие позволяет предположить, что NAMEG получены из скрытых рудных тел и первичных ореолов, а не из содержащих алюминий наночастиц, образованных в результате супергенных биогеохимических и химических процессов.

2.2.3. Изотопный состав Pb.

Изотопы Pb являются наиболее прямым доказательством корреляции между геогазом и скрытыми рудными месторождениями, особенно месторождениями сульфидов металлов, богатых Pb, которые обеспечивают прочную основу для анализа источников NAMEG. Теоретически, значительные различия в изотопных составах Pb между фоновыми и аномальными областями, а также значительное сходство изотопных составов Pb между аномальными областями и скрытыми рудными месторождениями указывают на вклад скрытых руд в изотопный состав Pb в геогазе.

Предыдущие исследования показали, что состав изотопов Pb в геогазе генетически связан со скрытыми рудными месторождениями. Были проведены подробные исследования изотопного состава Pb в геогазе из фоновых и аномальных зон, лесса, красного слоя, пристенных пород и руд на м-ниях Pb-Zn Цзяолунчжан, Ганьсу, и выявили, что изотопный состав Pb в геогазовых аномалиях над скрытыми рудными телами отличается от фонового, а также изотопного состава руд в геогазовых аномалиях над скрытыми рудными телами. Разница между изотопным составом Pb стеновых пород и руд (рис. 4а).

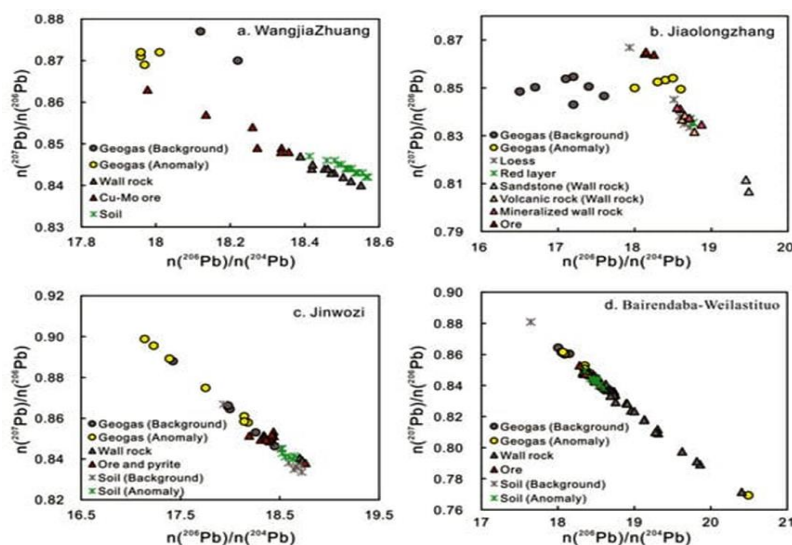


Рис. 4. Участок $^{206}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ в сравнении с участком $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в стеновых породах, капроках, геогазе и рудах: на м-нии Си Ванцзячжуан (а), м-нии Pb-Zn Цзяолунчжан (б), м-нии Au Цзинвоцзы (с) и м-нии Pb-Zn Байрендаба - Вайластитую (д)

Результаты подтверждают вклад скрытых рудных месторождений в аномальное содержание Pb в геогазе. Предположили, что составы изотопов Pb в геогазе аналогичны составам в образцах руды м-ния меди Ванцзячжуан в Цзоупине, провинция Шаньдун, а значительная разница между составами изотопов Pb в геогазе из аномальных зон и вышележащей почвы демонстрирует, что состав Pb в почве не является доминирующим фактором для состава изотопов Pb в геогазе (рис. 4б). Тематические исследования указывают на вклад скрытых рудных месторождений в NAMEG.

Однако составы изотопов Pb в геогазе (фоновые и аномальные области), почве, руде и породах на м-нии Цзинвоци Ау, Синьцзян, и месторождении полиметаллических руд Байрендаба-Вэйластитую во Внутренней Монголии не позволили подтвердить генетическую взаимосвязь между составом изотопов Pb в геогазе из аномальных областей и скрытых рудных залежей. На м-нии Цзинвоци Ау составы изотопов Pb в геогазе фоновых и аномальных зон существенно не отличались, что может быть вызвано ограниченной разницей в составах изотопов Pb между рудой и породой, примыкающей к ней (рис. 4с). Напротив, составы изотопов Pb в геогазе из фоновых и аномальных областей м-ния полиметаллических руд

Байрендаба-Вейластитую также не показали существенной разницы, хотя разница между составами изотопов Pb в руде и в стеновых породах была относительно значительной (рис. 4d).

Незначительная разница в составе изотопов Pb между геогазом из фоновых и аномальных зон и слабая генетическая взаимосвязь между составами изотопов Pb в геогазе из аномальных зон и скрытых рудных месторождений могут быть результатом двух факторов. Во-первых, на изотопный состав Pb в геогазе может влиять изотопный состав Pb пород, через которые газ течет вверх. Таким образом, изотопный состав Pb в геогазе из аномальных областей значительно отличается от состава изотопов Pb в глубоких скрытых рудных месторождениях, поскольку в геогазе преобладает изотопный состав изотопов Pb в мощной породе. Во-вторых, изотопный состав улавливающего раствора Pb может быть еще одним фактором, влияющим на прослеживаемость изотопов Pb (рис. 5).

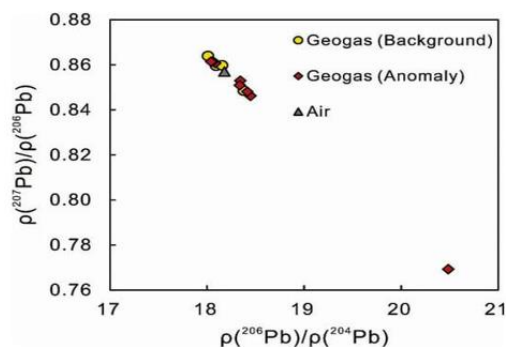


Рис. 5. Изотопные характеристики Pb в пробах геогаза и воздуха на Pb-Zn м-нии Байрендаба-Вейласитую.

2.2.4. Структура редкоземельных элементов.

Сравнительное исследование, проведенное на золотом м-нии Чжанцюаньчжуан показало, что структура РЗЭ в геогазе была аналогична структуре руд, и что общее содержание РЗЭ в геогазе над скрытыми рудными месторождениями было выше, чем в фоновых образцах геогаза. Предположили, что структура РЗЭ в геогазе над скрытыми рудными месторождениями имеет отчетливую наследственную связь с метаморфо–метасоматическими гранитами и скарнами на м-нии Huangshaping Pb-Zn, провинция Хунань. Было выявлено, что структура содержания РЗЭ в геогазе и образцах руды на месторождении золота Цзинвози 210 в Синьцзяне схожа, характеризуется относительным обогащением легкими редкоземельными элементами, относительной потерей тяжелых редкоземельных элементов и отсутствием значительных аномалий Eu и Ce. Было проведено комплексное исследование структуры РЗЭ фоновых почв и геогаза, а также руд, вмещающих пород и геогаза в аномальных зонах м-ния Pb-Zn Цзяолунчжан. Результаты показали, что РЗЭ геогаза из аномальной зоны характеризуется более высоким общим содержанием РЗЭ и небольшими колебаниями содержания РЗЭ, которые также могут быть вызваны характеристиками РЗЭ во вмещающих породах и реголите и пределом

аналитического обнаружения. Однако эффективное определение того, происходят ли РЗЭ в геогазе аномальной зоны из скрытых рудных месторождений, является сложной задачей, поскольку руды и вмещающие породы имеют схожий характер содержания РЗЭ.

2.2.5. Взаимосвязь между содержанием наноразмерных металлов в геогазе и в рудах.

Решающее значение имеет исключение почвы как основного фактора, влияющего на NAMEG. Если названия в основном происходят от почвы, значение поиска скрытых рудных месторождений с использованием геогаза больше не будет иметь значения, потому что поиск скрытых рудных месторождений с использованием геогаза не может предоставить информацию о скрытых рудных месторождениях в районах с экзотическим растительным покровом.

Исследования изотопов Pb на м-ниях Цзинвоци Au, Ванцзячжуан Cu и Байрендаба-Вейласитуо полиметаллических сульфидных руд показали, что изотопный состав Pb геогазов и почв в аномальных зонах различен. Полевые исследования показали, что при геохимической разведке существуют три отличительные взаимосвязи между скрытыми рудными месторождениями, почвой и геогазом: (1) сосуществование геогазовых и почвенных геохимических аномалий над скрытыми рудными месторождениями, (2) наличие геогазовых аномалий без почвенных аномалий над скрытыми рудными месторождениями и (3) наличие почвенных аномалий без геогазовых аномалий.

В первом сценарии как геогаз, так и почвы над скрытыми рудными месторождениями содержат аномальные рудообразующие элементы, указывающие на наличие скрытых рудных месторождений. Например, распределение содержания рудообразующих элементов (Zn, Cu, Sb и Pb) в геогазе и почве вдоль разведочной линии 20 на месторождении Pb-Zn Цзяолунчжан является в высшей степени последовательным. Это может быть связано с относительно небольшой глубиной залегания скрытых рудных тел и тонким транспортируемым покровом; здесь как геогазовая, так и геохимическая характеристика почвы может указать на наличие скрытого оруденения. Тот же результат также наблюдается в геогазе и почве вдоль разведочной линии 15 над скрытыми рудными залежами Cu м-ния Ванцзячжуан. В отличие от предыдущего случая, геогазовые и почвенно-геохимические аномалии присутствуют над скрытыми рудными телами, но их местоположение не совпадает на некоторых месторождениях, например, месторождении Dongji Au и месторождении Dongshan Pb-Zn в провинции Юньнань.

Второй сценарий проявляется в районах, где традиционные геохимические исследования почвы не смогли выявить скрытые рудные залежи; однако геогазовые исследования предоставляют убедительные доказательства их обнаружения. М-ние Pb-Zn Цзяолунчжан покрыто лессом, и аномальные содержания Cd, Zn, Pb и Cu в пробах геогаза проявляются над

скрытыми рудными залежами вдоль разведочной линии 48; напротив, геохимических аномалий в соответствующих почвах обнаружено не было. В лесостепной зоне Cu–Mo м-ния Тайпингоу, было продемонстрировано, что аномалии Mo геогаза без соответствующих аномалий Mo почвы действительны для поиска скрытых рудных месторождений. На рудном м-нии редких металлов Цзяцзика обнаружены значительные геогазовые аномалии Li, Be, Rb, Cs, Na и B, но геохимических аномалий почвы вдоль разведочной линии 35 рудного тела X03 на глубине 30–100 м ниже поверхности земли не обнаружено.

Третий сценарий проявляется в районах с выходами рудных тел (или минерализацией), в которых рудообразующие элементы проявляют высокую активность в условиях гипергенного выветривания. Рудообразующие элементы, образующиеся в результате выветривания обнажений, подвергаются миграции на большие расстояния и образуют вторичные геохимические аномалии вдали от первичных ореолов. Это было показано на примере Cu–Mo м-ния Тайпингоу, поскольку Mo обладает высокой активностью во время гипергенного выветривания. Кроме того, влияет ли загрязнение поверхности (например, шлак и район скопления руды) на поиск скрытых рудных месторождений с использованием геогаза. Было предположено, что накопление шлака на поверхности существенно влияет на геогазовые аномалии. Например, было выявлено отсутствие аномалии NAMEG в районе, загрязненном предыдущим складированием Pb–Zn руд.

Сравнений геохимических исследований почвы и геогаза достаточно, чтобы показать, что рудообразующие элементы в геогазе получены из скрытых рудных месторождений, а не из почв. Например, было продемонстрировано, что углеродсодержащие частицы (содержащие C и металлические элементы, например, Fe, Zn, Au, Cu и Pb) в геогазе происходят исключительно с больших глубин, а не из почвы, и содержат ценную информацию о скрытых рудных месторождениях. Предположительно, NAMEG меньший по размеру, имеет более высокую степень полимеризации и проще по составу, чем почва.

2.3. Факторы, влияющие на поиск металлов с использованием геогаза.

Поиск скрытых рудных месторождений с использованием геогаза состоит из трех компонентов: геогаза, рудных месторождений и вертикальной миграции. Факторы, влияющие на эти три параметра, могут оказать существенное влияние на поиск металлов с использованием геогаза.

Влияющие факторы, связанные с геогазом, включают источник, состав и поток геогаза, а также изменения в геогазе в гипергенных средах. Геогаз образуется в результате глубинной дегазации, выбросов газов из рудных месторождений, атмосферных воздействий и барометрической перекачки атмосферных газов. Теоретически, было бы очень полезно для

поиска скрытых рудных месторождений с использованием геогаза, если бы скрытые рудные месторождения могли выделять большое количество газов (CO_2 , SO_2 , H_2S , Hg и CH_4) из-за снижения температуры и давления или атмосферных воздействий; эти газы, как правило, содержат большое количество названий, связанных с рудой. из скрытых рудных месторождений. Глубинная дегазация грунта полезна при поисках скрытых рудных месторождений, находящихся на больших глубинах. Газы, образующиеся в результате выветривания, барометрической перекачки атмосферных газов, разложения органического материала, испарения и других процессов, играют важную роль в поиске скрытых рудных месторождений с использованием геогаза, когда супергенез воздействует на скрытые рудные месторождения.

Геогаз претерпевает значительные изменения в гипергенной среде. Некоторые составы геогаза в больших количествах растворяются в грунтовых водах (CO_2 , H_2S и SO_2). Часть состава геогаза будет подвергаться окислению и восстановлению. Эти изменения неизбежно приводят к десорбции NAMEG, что может привести к относительно высокой концентрации наночастиц в подземных водах.

Было проведено несколько исследований адсорбционной и транспортной способности наночастиц геогазом различного состава и потока геогаза при поисках с использованием геогаза. Однако, адсорбционные и транспортные возможности геогаза с разным составом наночастиц различны.

На состав NAMEG влияют различные сложные факторы. Во-первых, породы, через которые проходит геогаз, вносят свой вклад в NAMEG; таким образом, вскрышные породы действуют как естественное сито или барьер. Сигналы наночастиц, связанных с рудой, значительно ослабевают, если вскрышная порода мощная, низкопроницаемая и богата рудообразующими элементами, что может увеличить фоновые значения. Некоторые наночастицы удерживаются в микропорах и микротрещинах или адсорбируются почвами. Кроме того, наночастицы, связанные с рудой, очень нестабильны и могут диссоциировать из геогаза в жидкую и твердую фазы из-за изменений Eh, pH и других факторов.

Важным преимуществом поиска скрытых рудных месторождений с использованием геогаза является то, что аномалии геогаза проявляются над скрытыми рудными месторождениями. Для реализации вертикальной миграции геогаза должны присутствовать вертикальные проницаемые каналы. Геогаз будет мигрировать латерально по каналам с высокой проницаемостью (например, песчаник, трещины и разломы), если над скрытым рудным телом расположен плотный слой. В этом случае геогазовые аномалии не будут проявляться непосредственно над скрытыми рудными месторождениями.

Вертикальная миграция геогаза далее разделяется на два примера для обсуждения. В первом случае над скрытыми рудными месторождениями не расположены плотные слои (например, аргиллит, сланец и известняк), которые могут препятствовать вертикальной миграции геогаза. Наиболее распространенным сценарием является то, что скрытое рудное тело покрыто реголитом, который характеризуется высокой пористостью и проницаемостью. Другой случай характеризуется наличием разломов под большим углом, зон вертикальных разломов.

Кроме того, факторы, влияющие на поиск скрытых рудных месторождений с использованием геогаза, включают методы отбора проб, учитывающие среду, погоду и температуру. В настоящее время внедрили метод активного отбора проб с использованием среды для отбора проб, состоящей из царской водки и пенопласта.

3. Образование нанометаллов в процессе минерализации.

С развитием аналитических методов в различных породах и рудных месторождениях было обнаружено большое количество наночастиц металлов и минералов (рис. 6).

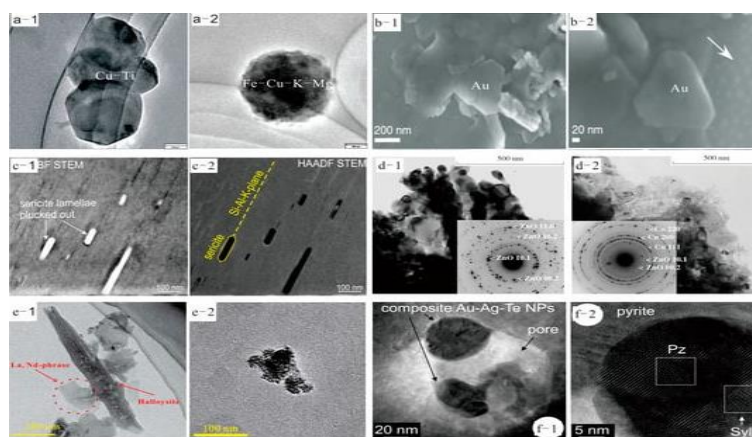


Рис. 6. Наночастицы металлов и минералов в различных рудных месторождениях.
Cu-Ti (a-1) и Fe-Cu-K-Mg (a-2) в Cu-Ni м-нии; (b-1, b-2) Au; (c-1, c-2) серицит в Олимпик Дам; ZnO (d-1, d-2) и Cu в рудов полт Дукам; La-Nd (e-1 e-2), Ce, в редкоземельных элементах и (f-1, f-2) Au-Ag-Sb в пирите.

Их состав был количественно определен и предполагает, что различные геологические и геохимические процессы могут образовывать различные наночастицы металлов и минералов

Была разработана одномерная и сферически симметричная внутренне согласованная теория для описания кавитационного механизма образования минеральных нано- и микросфер в гидротермальных флюидах. Предположили, что размеры нано- и микросфер, образующихся в результате кавитации, в первую очередь зависят от теплофизических свойств их составляющих, а не от глубины залегания вмещающей породы. Наблюдали большое количество наночастиц элементов платиновой группы (PGE-NPS) на хромитовом месторождении Каридад (восточная Куба) и предположили, что PGE-NPS могут

образовываться при широком спектре температурных условий и давления. Кроме того, водные флюиды могут вносить значительный вклад в образование PGE-NPS во время метаморфизма хромитовых месторождений. Наблюдала включения наночастиц гематита, содержащих Si, и наночастиц Cu и Cu-As, и пришли к выводу, что характеристики их распределения указывают на взаимодействие флюида и минерала. Были проведены исследования наночастиц в пирите с точки зрения микроструктуры минеральных кристаллов. Наблюдала значительное количество различных наночастиц в матрице деформированного и поликристаллического пирита из эпитеpmальных месторождений.

Наночастицы можно разделить на три группы в зависимости от их химического состава: самородные металлы, сульфиды и сульфосоли, а также наночастицы, содержащие железо. Предположили, что наночастицы образовались путем выделения из матрицы пирита или путем прямого осаждения из гидротермального раствора. Было задокументировано прикрепленные к порам композитные наночастицы Au-Te в свободном от As пирите - наночастицы Au-Te указывают на захват Au во время метаморфизма. Основываясь на детальном исследовании золотосодержащих пиритов из золоторудного месторождения Цзяодун, предположили, что наночастицы золота внедряются в поверхность раздела кристаллов или иногда в кристаллическую решетку (0,22–0,54 нм) пирита, что имеет важное значение для визуализации распределения и агрегации золота в пирите.

4. Миграция во вторичном процессе.

Рудные месторождения были разделены на семь типов. *Tun A* - это открытые месторождения, которые могут быть очерчены с помощью традиционных литогеохимических исследований и геохимических исследований речных отложений, а также «невооруженным» глазом из-за их естественного расположения на поверхности Земли. *Tun B* - скрыты во вмещающих породах, и первичные ореолы (ореолы утечки или диффузии) эффективны для выявления этих геохимических аномалий. *Tun C* - покрыты чехлами, и для их обнаружения полезны геохимические исследования почвы и речных отложений. *Tun D* - полностью покрыты перемещенными чехлами; следовательно, традиционные почвы и речные отложения не подходят для их идентификации. *Tun E* - скрыты различными покровами после минерализации (например, вулканическими и осадочными породами, аллювием и покровом выветривания). *Tun F* - залегают у подножия вулканических пород, над которыми хорошо развит транспортируемый покров. *Tun G* - залегают в осадочных породах (рис. 7).

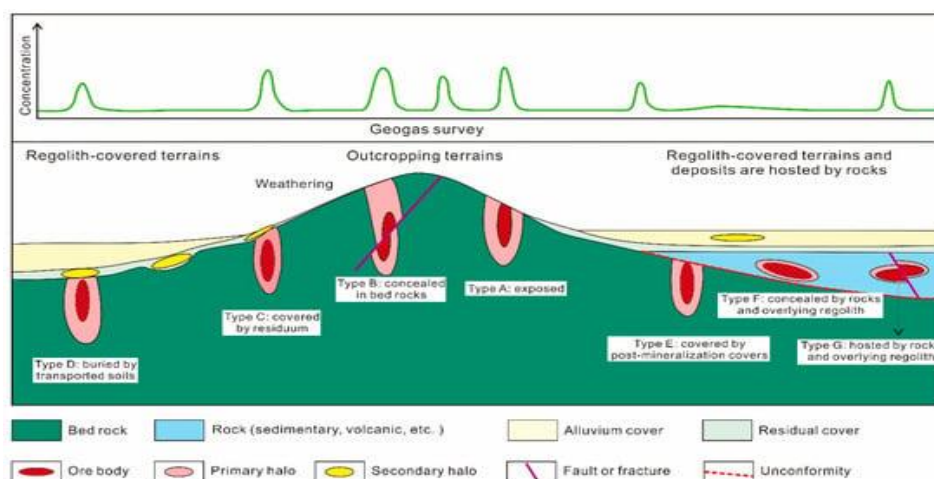


Рис. 7. Схематическая диаграмма семи типов рудных месторождений и соответствующие характеристики геогазовых аномалий.

Месторождения типов D, E, F и G сложно обнаружить с помощью обычных геохимических методов, которые обычно применяются в горных породах, почве и донных отложениях. Использование геогазового поиска металлов не требуется при геохимической разведке месторождений типа A, B или C, поскольку традиционные и экономичные геохимические исследования горных пород, почвы и донных отложений ручьев эффективны для обнаружения этих месторождений.

Подробные демонстрации генезиса аномалий NAMEG на месторождениях типов D, E, F и G проводились по отдельности (рис. 8).

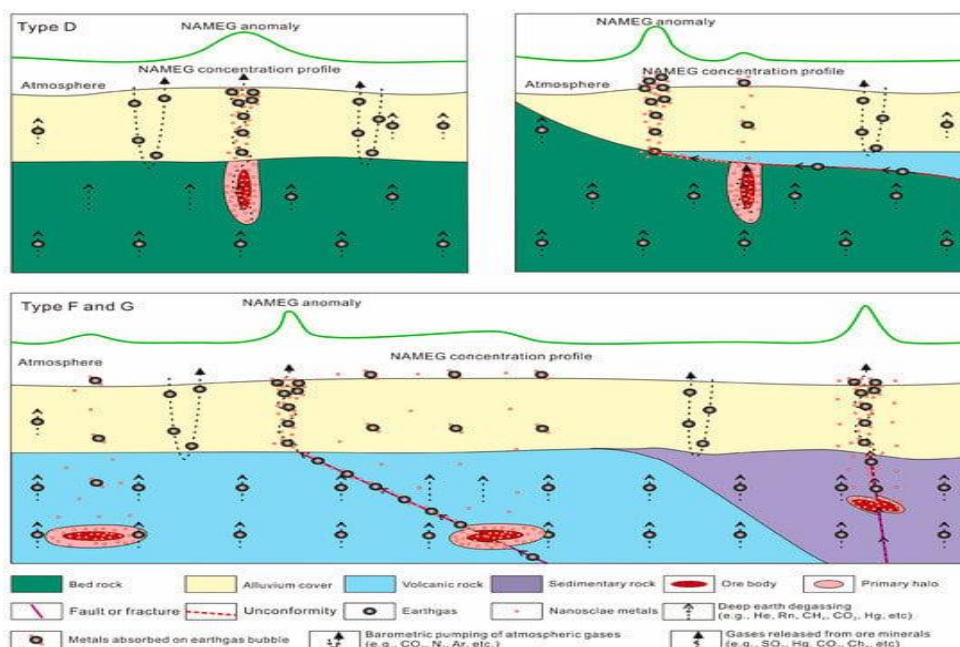


Рис. 8. Схематическая диаграмма, аномалии NAMEG для скрытых рудных месторождений на покрытых реголитом территориях (стрелки показывают направление миграции геогаза).

Месторождения типа D чаще всего исследуются с целью поиска металлов с использованием геогаза. NAMEG мигрирует вертикально через проницаемый реголит, образуя

таким образом аномалии над скрытыми рудными месторождениями. Восходящие потоки геогаза образуются в результате барометрической перекачки атмосферных газов, газов, выделяющихся из рудных месторождений, и глубинной дегазации; среди них газы, выделяющиеся из рудных месторождений, могут быть доминирующими. Выветривание рудных месторождений может высвобождать и образовывать большое количество наноразмерных металлов, что жизненно важно для формирования сильных аномалий NAMEG над скрытыми рудными месторождениями (рис. 8). Проницаемый реголит обеспечивает свободную вертикальную миграцию наноразмерных металлов и геогаза; то есть над скрытыми рудными месторождениями нет слоев с низкой проницаемостью (например, аргиллитов и сланцев). В противном случае наноразмерные металлы и геогаз мигрируют латерально, а не вертикально по проницаемым каналам (например, проницаемый песчаник, реголит, разломы и трещины). Кроме того, толстый слой реголита не способствует образованию сильных аномалий NAMEG над скрытыми рудными месторождениями. Наноразмерные металлы подвергаются окислению, восстановлению, адсорбции и другим геохимическим процессам, которые приводят к их удержанию в почве.

Вмещающие породы на месторождениях типа E состоят из низкопроницаемых пород (например, вулканических и осадочных) и проницаемого реголита. Зоны их контактов являются идеальными каналами транспортировки геогаза. Наноразмерные металлы, переносимые геогазом, сначала мигрируют в поперечном направлении вдоль несогласия, а затем вертикально через реголит. Таким образом, сильные аномалии NAMEG появляются там, где низкопроницаемый слой выступает на поверхность. Над скрытыми рудными месторождениями наблюдаются слабые аномалии NAMEG или их нет (рис. 8).

Месторождения как типа F, так и G характеризуются низкопроницаемыми породами над ними. В этих условиях проницаемые каналы, такие как разломы и трещины, связанные с рудным телом, жизненно важны для формирования аномалий NAMEG. Местоположения аномалий NAMEG появляются непосредственно над скрытыми рудными месторождениями и в других местах, в зависимости от наличия разломов и зон трещиноватости (рис. 8). В противном случае над скрытыми рудными месторождениями обнаруживаются слабые геохимические аномалии или их вообще нет. Разломы (или трещины) играют жизненно важную роль в формировании аномалий NAMEG над скрытыми рудными месторождениями с низкопроницаемыми вмещающими породами. Разломы (или трещины) являются предпочтительными путями миграции геогаза, поскольку они представляют зоны с повышенной проницаемостью. Более убедительные доказательства миграции наноразмерных металлов, переносимых геогазом, вдоль разломов (или трещин) получены с помощью

просвечивающей электронной микроскопии и сканирующей электронной микроскопии в зонах разломов. Наблюдали обилие наноразмерных рудообразующих частиц в разломных зонах на различных рудных месторождениях (например, месторождении золота Шангонг, полиметаллическом месторождении Байрендаба и месторождении железа Качиутата). Сочетания наноразмерных металлов в рудах и геогазе предоставляют доказательства генетического механизма метода NAMEG.

Кроме того, многие механизмы способствуют транспортировке металлов, связанных с рудой, вверх по экзотическим покровам. Таким образом, покровы скрытых рудных месторождений, как правило, содержат определенное количество металлов, связанных с рудой, которые также могут способствовать образованию NAMEG. Например, частицы золота и ионное золото могут быть преобразованы в наночастицы с участием органических веществ и микроорганизмов. Также рассматриваются биопленки, живущие на зернах Au, как эффективные «фабрики» наночастиц, которые способствуют диспергированию Au посредством образования наночастиц.

Геохимические аномалии могут образовываться и над скрытыми рудными месторождениями, когда над ними находятся низкопроницаемые породы. Однако такие геохимические аномалии настолько слабы, что как искусственные, так и естественные факторы могут сделать их бессмысленными.

5. Эффективность применения.

5.1. Различные типы рудных месторождений.

Теоретически геогаз переносит наночастицы, связанные с рудой, на поверхность, образуя геохимические аномалии, когда они проходят через скрытые рудные месторождения (рис. 9).

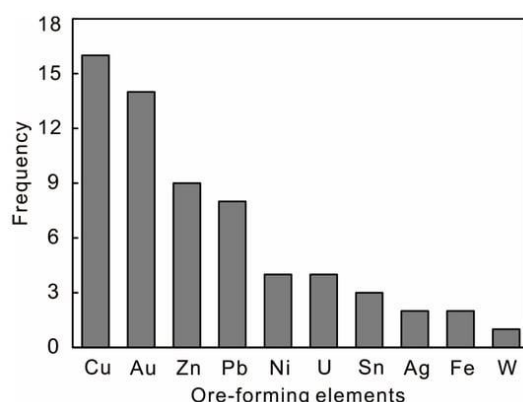


Рис. 9. Статистическая гистограмма успешных поисков металлов с использованием геогаза.

Результаты показали, что поиск скрытых рудных месторождений с использованием геогаза является потенциально эффективным инструментом для поисков рудных

месторождений Cu, Au, Zn, Pb, U, Sn и Ag. Было проведено несколько успешных исследований по месторождениям Fe и W. Хорошо известное сверхкрупное литий-полиметаллическое месторождение Цзяцзика в западной провинции Сычуань является эксклюзивным примером исследования месторождений редкометаллических руд. Геогазовые аномалии Li, Be, Rb, Cs, Na и В присутствуют над двумя месторождениями на глубинах 30-100 м, которые не сопровождаются какими-либо геохимическими аномалиями почвы. Примечательно, что рудообразующие элементы включают Li, Be, Nb, Ta, но геогаз не обнаруживает аномалий Nb, Ta. Это в некоторой степени предполагает, что не все рудообразующие элементы могут проявляться в виде геогазовых аномалий над скрытыми рудными месторождениями.

С точки зрения генетического типа месторождения, наиболее успешные тематические исследования (Cu, Zn, Pb, Ni, Ag и Fe) относятся к магматическим и гидротермальным месторождениям сульфидов, что указывает на то, что поиск металлов с использованием геогаза является весьма полезным инструментом для разведки таких месторождений. Примером осадочного месторождения является месторождение полиметаллического пирита Дуншэнмяо, которое представляет собой осадочный тип подводного объекта. В настоящее время применимость поиска металлов с использованием геогаза к различным рудным месторождениям ограничена. Необходимы дополнительные усилия для проверки эффективности поиска скрытых рудных месторождений с использованием геогаза для других типов рудных месторождений с различными рудными металлами (например, месторождения редкоземельных руд с адсорбцией ионов и отложения осадочного типа в коре палео-выветривания).

5.2. Различные геохимические ландшафты и климат.

Различные геохимические ландшафты характеризуются различными геологическими условиями, климатом, развитием растительности и покровами, все из которых могут влиять на эффективность поиска металлов с использованием геогаза. Разделение ландшафтов Китая, подходящее для геохимической разведки, было принято для демонстрации применимости поиска металлов с использованием геогаза в различных геохимических ландшафтах.

Геохимические ландшафты с успешными полевыми экспериментами и применением поиска металлов с использованием геогаза включают карсты, пустыню Гоби, болота и леса, лессы, влажные холмы, влажные холодные горы, аллювиальные равнины, тропические леса, засушливые холмы, засушливые холодные горы и каньоны. (рис. 10).

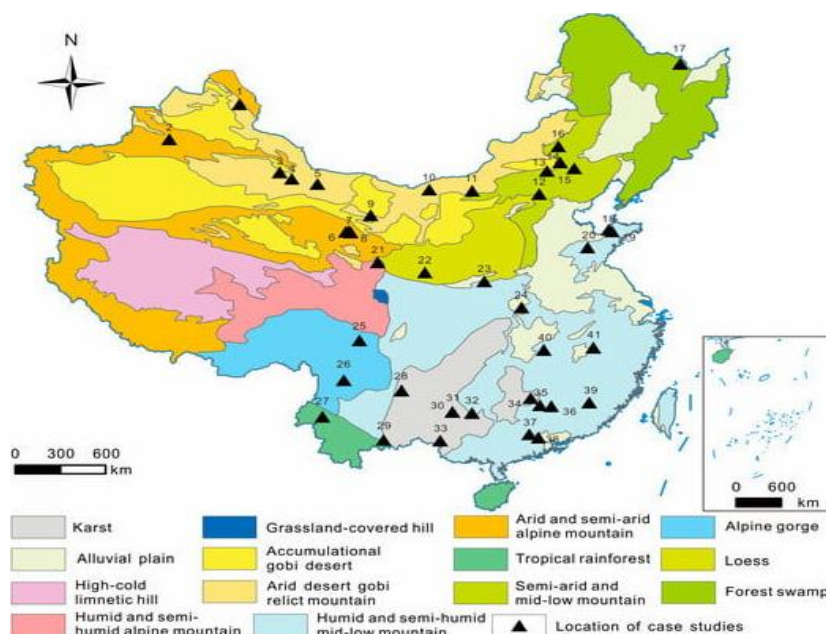


Рис. 10. Схема поисков скрытых рудных месторождений с использованием геогаза в различных геохимических ландшафтах Китая.

- 1 — м-ние *Au* Salbulack, 2 — м-ние полиметаллических руд *W-Sn*, 3 — м-ние золота *Jimwozi* 210, 4 — м-ние *Cu-Ni* Тянью, 5 — м-ние порфировой меди *Gongroquan*, 6 — м-ния в районе Бэйцзялянь, 7 — м-ния в Бассейн Хэйхэ, 8 — м-ния в районе Гадабан, 9 — м-ние железа Касютата, 10 — м-ние полиметаллического пирита Доншенмяо, 11 — золоторудный район Лаоянхао, 12 — золотой район Чжанцзяоаньчжуан, 13 — м-ние меди Будунхуа, 14 — район разведки урана Хуншаньцзы, 15 — золоторудное м-ние Чайхуланцзы, 16 — свинцово-цинковое м-ние Байрендаба, 17 — золоторудное м-ние Туаньцзегоу, 18 — золоторудное м-ние Дайингэчжуан, 19 — золоторудное м-ние Дунци, 20 — м-ние меди Ванцзячжуан, 21 — м-ние *Cu-Ni* Лаушуйся, 22 — м-ние *Pb-Zn* Цзяолунчжан, 23 — м-ние золота Шэнцзяо, 24 — м-ние *Cu-Ni* Чжэюань, 25 — м-ние редкометаллических руд Цзяцзика, 26 — разведочный район Мофаньцунь, 27 — м-ние *Pb-Zn* Дунишань, 28 — медный рудник Тунчанхэ, 29 — месторождение меди Кафанг, 30 — Месторождение *Zn-Cu* в районе Дачан, 31 — месторождение полиметаллических руд *Dachang Sn*, 32 — м-ние сульфидов цинково-цинковой руды *Qingmingshan*, 33 — м-ние меди *Debao*, 34 — Свинцово-цинковое м-ние Фанькоу, 35 — м-ние *Ag-Pb-Zn* полиметаллических руд *Huangshaping-Liaojiaowan*, 36 — м-ние урана *Renhua aera*, 37 — Рудный район Хетай, 38 — м-ние золота Чанкэн, 39 — м-ние Юэян *Ag-Au*, 40 — м-ние урана Лицзядуань и 41 — м-ние меди Юэсин.

Среди них существует только одно успешное тематическое исследование в аллювиальных равнинных и лесно-болотных ландшафтах, что позволяет предположить, что эффективность поиска металлов с использованием геогаза в такой местности сомнительна. Следовательно, следует проводить больше полевых экспериментов и прикладных программ для поиска металлов с использованием геогаза в этих двух геохимических ландшафтах.

Геохимические ландшафты без успешных полевых экспериментов и применения геогазовых поисков металлов включают холмистые пастбища, пустыни и болота. Исследования по применимости поисков с использованием геогаза на холмистых лугах не имеют большого значения из-за их ограниченной площади в Китае. Пустынный ландшафт в основном состоит из пустынных бассейнов (например, Джунгарский, Таримский и Кайдамский бассейны). Эти пустынные бассейны характеризуются мощными транспортируемыми покровами, которые включают различные пласты с различной проницаемостью (например, проницаемый песчаник и низкопроницаемый аргиллит). Наличие низкопроницаемых пород, вероятно, препятствует вертикальному переносу геогаза и еще больше снижает эффективность поисков с его использованием. Болота являются типичным геохимическим ландшафтом на западе Китая и характеризуется скоплением эоловых песков, которые могут сильно мешать геохимическим

поискам. Следует провести дальнейшие исследования, чтобы продемонстрировать эффективность поисков с использованием геогаза в болотистых ландшафтах, поскольку этот метод потенциально может исключить влияние эоловых песков. Еще одним вопросом, который следует учитывать, является наличие вечной мерзлоты в болотных ландшафтах, которая может действовать как барьер во время вертикальной миграции геогаза.

6. Выводы.

1. Геогаз образуется в результате глубинной дегазации газов, выделяемых рудными месторождениями и барометрической перекачки атмосферных газов. Требуются дополнительные исследования для количественного определения точного источника газа и состава, который служит основным газом-носителем.

2. Аномалии геогаза различаются по размеру, форме, составу и структуре. Следует провести последующую работу, чтобы определить, могут ли характеристики NAMEG предоставить полезную информацию о скрытых рудных месторождениях.

3. Полевые эксперименты и приложения в Китае показывают, что поиск скрытых рудных месторождений с глубиной залегания >800 м в различных климатических зонах и геохимических ландшафтах является полезным инструментом, с помощью которого были построены возможные генетические модели аномалий NAMEG.

4. Магматические и гидротермальные месторождения являются основными типами руд, для которых были успешно проведены поиски с использованием геогаза. Требуется дальнейшее изучение применимости метода поисков металлов с использованием геогаза для особых типов руд и геохимических ландшафтов.

ИСТОЧНИКИ:

1. Hanliang Liu, Bimin Zhang, Xueqiu Wang, Zhixuan Han, Baoyun Zhang and Guoli Yuan. «APPLICATION OF THE FINE-GRAINED SOIL PROSPECTING METHOD IN TYPICAL COVERED TERRAINS OF NORTHERN CHINA». *Minerals* 2021, 11.
2. Jie Tang, Wenlei Wang and Changjiang Yuan. «A NEW ANISOTROPIC SINGULARITY ALGORITHM TO CHARACTERIZE GEO-CHEMICAL ANOMALIES IN THE DUOLONG MINERAL DISTRICT, TIBET, CHINA». *Minerals* 2023, 13.
3. 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.
4. Pumulo Mukube, Murray Hitzman, Lerato Machogo-Phao and Stephen Syampungani. «GEOCHEMISTRY OF TERRESTRIAL PLANTS IN THE CENTRAL AFRICAN COPPERBELT: IMPLICATIONS FOR SEDIMENT HOSTED COPPER-COBALT EXPLORATION». *Minerals* 2024, 14.
5. Qiang Wang, Xueqiu Wang, Zhizhong Cheng, Bimin Zhang, Zezhong Du, Taotao Yan, Huixiang Yuan, Xiaolei Li, Yu Qiao and Hanliang Liu. «GEOGAS-CARRIED METAL PROSPECTING FOR CONCEALED ORE DEPOSITS: A REVIEW OF CASE STUDIES IN CHINA». *Minerals* 2023, 13.
6. Renguang Zuo. «MINERAL EXPLORATION USING SUBTLE OR NEGATIVE GEOCHEMICAL ANOMALIES». *Journal of Earth Science*, 2021
7. S. Safari, M. Ziaii, M. Ghoorchi. «INTEGRATION OF SINGULARITY AND ZONALITY METHODS IN PREPARATION OF PROSPECTIVITY MAP OF BLIND MINERALIZATION». *IJMGE*, No.2, 2016.
8. Weitao Sun, Youye Zheng, Wei Wang, Xin Feng, Xiaosong Zhu, Zhongyue Zhang, Hongxing Hou, Liangsheng Ge and Hanqin Lv. «GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF PRIMARY HALOS AND PROSPECTING SIGNIFICANCE OF THE QULONG PORPHYRY COPPER–MOLYBDENUM DEPOSIT IN TIBET». *Minerals* 2023.

СОВРЕМЕННЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

В данном материале рассматривается полезность информации, полученной различными портативными аналитическими приборами, для выявления рудных месторождений, в том числе о минералах-индикаторах и элементах-навигаторах.

Одной из очевидных ограничений обычных программ лабораторного геохимического анализа является необходимость процедуры предварительной обработки образцов, занимающей много времени и требующей высокого уровня подготовки со стороны оператора. Кроме того, объем образцов часто очень велик, поэтому неизбежно возникает необходимость передачи образцов для анализа большому количеству лабораторий, что создает проблемы для контроля качества данных и сравнения данных из разных лабораторий. Таким образом, возможности портативных приборов экспрессного анализа геохимических образцов полезна для устранения этих проблем.

За последнее время были достигнуты значительные успехи в точности, достижимой с помощью портативных полевых аналитических приборов, таких как портативные рентгенофлуоресцентные спектрометры (pXRF), портативные рентгеновские дифрактометры (pXRD), портативные спектрометры ближнего инфракрасного и коротковолнового инфракрасного диапазонов (pNIR-SWIR спектрометры), спектрометры μ Raman, портативные спектрометры лазерного пробоя (pLIBS), светодиодные флуориметры, керновые сканеры, портативные гамма-спектрометры, используемые для поисков полезных ископаемых.

Портативные оптические спектрометры, благодаря возможности генерировать быстрые и высококачественные данные, вносят наиболее значительный вклад в геохимические поиски. Хотя портативные методы, такие как pXRF, существовали и раньше, в последнее время они стали более универсальными, включая легкие перезаряжаемые батареи, системы глобального позиционирования (GPS), беспроводные компьютерные технологии Bluetooth, дистанционное управление и др.

Также на конкретном практическом примере представлена оценка эффективности портативных полевых аналитических рентгенофлуоресцентных спектрометров (pXRF) для анализа содержания поисковых геохимических элементов в различных матрицах, таких как золотые пески и аллювий.

I. МИНЕРАЛЫ-ИНДИКАТОРЫ, ЭЛЕМЕНТЫ-НАВИГАТОРЫ, ПОРТАТИВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ [2].

1. Минералы-индикаторы.

Магматические и гидротермальные минералы, такие как циркон, апатит, титанит и рутил, устойчивы к атмосферным воздействиям и поэтому оседают в почве, тилле или речных отложениях, что указывает на наличие в коренных породах определенного типа минерализации, гидротермальных изменений или литологии, и эти минералы все чаще становятся объектом исследований при поисках. Они называются минералами-индикаторами, которые предоставляют информацию о химическом составе исходной магмы, включая температуру кристаллизации, степень фракционирования, содержание воды и степень окисления. Индикаторные минералы стали важными при поисках месторождений золота, алмазов, редкоземельных элементов, элементов платиновой группы, неблагородных металлов и лития за последние четыре десятилетия. В настоящее время в результате исследований были выявлены наборы индикаторных минералов для различных типов месторождений. Например, исследование минералов-индикаторов в местности распространения ледников, содержащей сильно повышенные концентрации зерен сфалерита и незначительного галенита, помогло обнаружить перспективные залежи цветных металлов, залегающих в меловых сланцевых породах северной Альберты, Канада. Фаялит (Fe_2SiO_4), минерал от красновато-коричневого до черного цвета, богатый железом конечный элемент серии твердых растворов оливина, который можно найти во всем мире в магматических и абиссальных породах. Кристаллы фаялита в осадке гранитоподобной магмы могут содержать большое количество HREE. Следовательно, фаялит помогает находить месторождения РЗЭ. Известно использование химического состава обломочного рутила в качестве индикатора минерализации и определения некоторых микроэлементов, которые однозначно отличают зерна рутила, полученные в результате минерализации, от зерен, полученных из бесплодных пород. Например, рутил, полученный из месторождений Au и обогащенные Sb, можно отличить от рутила из пегматитов, которые обогащены Nb, Ta и Sn. Рутил из бесплодных пород можно идентифицировать по содержанию W и Fe. В центральном регионе Ганы рентгенографическими исследованиями обнаружили, что основными индикаторами при поисках золота являются кварц, магнетит и гематит (табл. 1).

Различные типы месторождений, полезные ископаемые и элементы.

Deposits of Interest	Type of Deposit	Main Pathfinder Minerals	Main Pathfinder Elements
Gold		Pyrite, chalc-pyrite, arsenopyrite, bismuthinite magnetite, tellurides, tetrahedrite, pyrite, sphalerite, muscovite, monazite, bastnäsité, quartz, scheelite, wolframite, cassiterite.	Fe, Mn, Cu, Co, Ni, Sb, Zn, As, Bi, Te, Sn, Se, Tl, Ag, Hg, Pb, Mo and W.
	Carbonatite rocks	Bastnäsité group, ancylite, monazite, (fluor)apatite, pyrochlore, xenotime, florencite.	Na, Mg, Fe, P, Ba, F, S, Sr, Ca, Nb, Th, U, Zr, Cu, Ta, Ti, V, Mn, Pb.
	Igneous rocks (including hydrothermal upgrade)	Bastnäsité group, aegirine, eudialyte, loparite, allanite, monazite, fergusonite, zircon, xenotime, fluorapatite, ancylite, gadolinite, euxenite, mosandrite.	Na, K, Fe, Al, Zr, Ti, Nb, Ta, Li, F, Cl, Si, Th, U, P, Cs, Rb, Sn, W, Mo, Be, Ga, Hf, Mn, B.
	Placers and palaeoplacers	Monazite, xenotime, allanite, euxenite.	Ti, Nb, Zr, Au, Sn, Th, U, Pb, F.
REE	Laterites	Monazite, apatite, pyrochlore, crandallite group, bastnäsité group, churchite, rhabdophane, plumbogummite, zircon, florencite, xenotime, cerianite.	Fe, Al, Nb, Zr, Ti, Sn, Mn, P, low Si, negative Ce anomaly.
	Ion-adsorption	Clay minerals (mainly kaolinite and halloysite).	High Si (>75%), low P.
	Iron oxide-associated (including IOCG) deposits	Bastnäsité, synchysite, monazite, xenotime, florencite, britholite.	Fe, Cu, U, Au, Ag, Ba, F, P, S.
	Seafloor deposits, such as manganese nodules, ferromanganese crust, phosphorite.	Vernadite, todorokite, Fe-oxyhydroxide, carbonate fluorapatite, francolite.	Mn, Fe, P, Cu, Ni, Co.
Cu-Ni-PGE		pentlandite, chalcopyrite, pyrite, millerite, PGM, chromite, Cr-diopside, enstatite, olivine, Cr-andradite.	Ni, Cu, Pd, As, Cr, Co, S, PGE
Volcanogenic massive sulphide (VMS) deposits (Cu, Pb, Zn, Ag, Au)		Galena, sphalerite, chalcopyrite, pyrrhotite, gold, pyrite, gahnite, staurolite, cassiterite, spessartine, sillimanite, andalusite, beudantite, jarosite, barite, tourmaline, hogcomite, nigerite.	Cu, Zn, Pb, Ag, Mo, Sn, Ba, As, Sb, In, Te, Bi, and Tl
W-Mo-Bi, and Sn-Zn-In deposits		Cassiterite, wolframite, molybdenite, topaz, chalcopyrite, galena, sphalerite, arsenopyrite, pyrite, loellingite, beudantite, anglesite, plumbogummite, plumbogummite.	Ag, As, Cd, Cu, Pb, Re, Te, Tl
Li		Spodumene, petalite, amblygonite, quartz, K-feldspar, albite, or montebrasite, lepidolite, zinnwaldite, eucryptite, cassiterite, lithiophilite, holmquistite, triphylite, quartz, muscovite, apatite, tourmaline tantalite-columbite, beryl.	K, Ca, Rb, Sr, Y, Nb, Sn, Cs, Ta, Sb, W, Bi, As, Ga, Tl, and the REE
Kimberlite-hosted diamonds	-	Cr-pyrophe, Cr-diopside, eclogitic garnet, Mg-ilmenite, chromite, olivine, diamond.	C
U		Uraninite (pitchblende), thorionite, tourmaline, sulphides, monazite, allanite, zircon, baddelyite, niccolite, U-Th anatase, U-Th rutile, brannerite, magnetite.	Cu, Ag, As, Cr, Pb, Zn, Ni, Co, Re, Be, P, Mo, Mn, REE and radiogenic Pb isotopes

2. Элементы навигаторы.

При поисках элементы навигаторы вместе с минералами-индикаторами (табл. 1) обеспечивают средство оценки больших площадей на предмет их минерального потенциала путем исключения вероятных безрудных участков. Например, ртуть была признана элементом-навигатором как для месторождений благородных, так и цветных металлов. Кроме того, обнаружено, что As, Mo, Ag, Sn, Sb, Te, W и Bi также действуют как элементы-навигаторы для золота. Хотя использование As, Sb и Bi в донных отложениях в качестве элементов-навигаторов минерализации основных металлов хорошо известно, при интерпретации данных необходимо

учитывать влияние pH подземных вод на гидроморфную дисперсию As, Sb и Bi. Ni и Cu] использовали в качестве элементов-навигаторов при поисках PGE. Эти два элемента легко обнаруживаются с помощью pXRF, а также коррелируются с драгоценными металлами, указывая на то, что их можно использовать в качестве навигаторов.

Таким образом, минералы-индикаторы и элементы-навигаторы вместе обеспечивают эффективное средство оценки минерального потенциала больших территорий. Иногда самый сильный сигнал исходил от элемента навигатора, такого как Tl, а целевые элементы Pb и Ag давали лишь слабый сигнал. При поисках золота в поясе Ва-Лавра, Северо-Западная Гана, используя многомерный статистический подход, обнаружили, что Fe и Mn тесно связаны с золотом, и наряду с Pb, Ag, As и Cu эти элементы могут быть использованы в качестве ориентиров для поиска золота в этом районе, с железистыми зонами в качестве целей. При определении элементов-навигаторов для золота в эпitherмальном месторождении с низким содержанием сульфидов, связанном со щелочными магматическими породами Крипл-Крик в Колорадо, США, обнаружили, что Ag, As, Bi, Te и W являются лучшими навигаторами, а также теллуриды, флюорит, кварц, карбонаты, роскоэлит, теннантит-тетраэдрит, пирит, сфалерит, мусковит, монацит, бастназит и хюбнерит являются минералами-индикаторами золотой минерализации в низкосортных вкрапленных рудах.

Иногда соотношения элементов могут быть полезны для оценки литогеохимических данных в качестве ориентира для определения различных типов минерализации в породах, которые либо проявляют изменения, либо не имеют заметных изменений. Например, значения K/Rb, равные 4,8, указывают на сильно фракционированную коренную породу и, следовательно, на возможную мишень для Li при его поисках. Эти соотношения могут быть использованы для идентификации и оценки плодородия гранитных материнских пород с учетом потенциала вмещения пегматитов. Литийсодержащие пегматиты обычно называют литий-цезий-танталовыми (LCT) пегматитами из-за обогащения несовместимыми элементами Li, Cs, Sn, Rb и Ta. Рудоносные граниты демонстрируют повышенное содержание Rb, Cs, Sn и Ta, а также более низкое соотношение K/Rb, чем обычные граниты. Граниты, связанные с минерализацией, обычно демонстрируют высокое соотношение Rb/Sr в результате фракционирования, и увеличение значений Rb/Sr от периферии к ядру медно-порфирового оруденения. Соотношения Mg/Fe, Cr/Al и Ca/Na были использованы для понимания химических и минералогических проявлений крупномасштабных и локальных процессов и для детальной интерпретации генезиса минерализации и распределения металлов в хромите, ортопироксене и плагиоклазе в ядрах буровых скважин с Меренского рифа и UG-2. Соотношения V/Ti и Cu/S в цельных породах, определенные методом pXRF, а также составы

плагиоклаза, оливина и клинопироксена, измеренные с помощью настольного сканирующего электронного микроскопа-энергодисперсионного спектрометра (SEM-EDS).использовали для изучения месторождений PGE.

3. Краткие сведения о портативных приборах, принципах их работы, компонентах, параметрах и особенностях применения.

Табл. 2

S. No	Name of the Portable Instrument	Working Principle	Components	Features	Applications
1	Short-wavelength infrared (SWIR) spectrometer	Can measure reflectance in the short wavelength infrared range of 1300–2500 nm based on the interaction between light and molecular bonds of minerals present in the sample.	Czerny–Turner, Echelle and Transmission Optical Spectrographs, NIR covers from 780 to 1400 nm, and SWIR from 1400 to 3000 nm.	Operates in absorption/transmission/reflection modes. High sensitivity over the NIR and SWIR range. Spectral analysis can identify several minerals, most minerals can be detected up to 0.01 wt.%.	Used for mapping both mineral assemblages and changes in mineral composition, as well as providing data to aid lithological characterization and the development of alteration maps and help to develop three-dimensional deposit models.
2	FTIR	FTIR spectroscopy is a dispersed method in which measurements are performed over a broad spectrum instead of a narrow band of frequencies. The interferogram signal is transmitted through or bounces from the sample surface, where specific energy wavelengths are absorbed. The beam eventually passes through the detector and is further passed on to the processing computer for Fourier transformation of energy signals.	Different components of FTIR are the IR source, interferometer, and a detector.	It is a non-destructive technique for obtaining molecular information, offers high precision, accuracy, speed, enhanced sensitivity, and ease of operation.	To determine the mineral species, mineral composition.
3	Instruments for Radiometric surveys (Geiger–Müller counter)	It detects ionizing radiation, such as alpha particles, beta particles, and gamma rays, using the ionization effect produced in a Geiger–Müller tube.	A G–M counter has two main parts—a sealed tube, or chamber filled with gas, and an information display.	The sensitivity of the GM tube is such that any particle capable of ionizing a single atom of the filling gas of the tube will initiate an avalanche of ionization in the tube.	It can detect radioactive isotopes such as ⁴⁰ K, ²³⁴ Th, and ²³⁸ U in rocks, minerals, and soils in the course of mineral prospecting.
4	XRF	When X-ray radiation strikes the sample, the inner shell electrons of the atoms of elements within the sample with sufficient energy to cause an electron in the K and L-shells to be displaced. The atom reestablishes equilibrium by another electron dropping into the vacated electron position. This return to atomic stability emits a photon of energy that is characteristic of each element present in the sample.	Comprises an X-ray excitation source, X-ray detector, and a data acquisition and analysis unit.	Detection limits of 5 to 30 µg/g for most trace elements, low background noise, high temperature stability, high resolution at high count rates, and fast processing times.	Used for the determination of the elemental composition of rocks, sediments, and other geological materials.
5	XRD	The diffraction patterns result from constructive interference between X-rays scattered by successive parallel atomic planes of the crystal structure.	Portable XRD houses a 2.7 W Rh anode transmission X-ray tube source and a 10 mm ² silicon drift detector (SDD).	The limit of detection in XRD is in the 1–5% range, which depends on the sample matrix.	XRD can perform qualitative and quantitative identification of minerals in rocks, soils, and other geological materials.
6	LIBS	When an intense and highly focused laser pulse interacts with a sample (solids, liquids, and even gases), a small plume of plasma consisting of electronically excited atoms and ions is created. As these atoms and ions decay back into their ground states, they emit characteristic wavelengths of light, which are isolated and detected.	A unit to generate a pulsed laser (typically an Nd-YAG 1064 nm laser) with a focusing system to vaporize a small portion of the sample, a spectrometer to capture the emitted light and isolate the light of the desired wavelength, and a detector.	No need for sample preparation, can detect all elements present in any type of sample using a single laser shot.	Determination of major, minor, and trace elements in rocks and other geological samples for pure and applied geochemical studies, ability to determine provenance using multivariate analysis, also can be used as a screening tool for selecting important samples for more precise analysis in a laboratory.
7	Raman Spectrometer	When light energy in the form of a laser interacts with molecules in a gas, liquid, or solid, which results in the energy of the laser photons being shifted up or down, the shift in energy gives information about the chemical composition of the sample.	There are three primary components to any Raman spectrometer: An excitation source, a sampling apparatus, and a detector.	Chemical identification, spontaneous and stimulated, detection of minerals up to 1 µg/g concentration. This instrument was also used in the deep ocean to identify different minerals on the ocean floor.	Can provide chemical and structural fingerprint information for earth materials (solids, powders, and liquids), can deliver both chemical composition and structural information in a single measurement.
8	LED fluorimeter	The uranyl ion is excited in the sample by using electromagnetic energy of suitable wavelengths and the decay is measured with the time of the uranium phosphorescence after the termination of the incident electromagnetic radiation.	Light source of suitable wavelength, excitation filter, sample holder, dichroic beam splitter, and emission filters.	Low cost, easy to operate, offers very low detection limit for uranium.	Mostly used in water quality monitoring, potential tool for uranium exploration studies, especially by hydrogeochemical prospecting methods.
9	Core scanner based on XRF technology	Works on the principle much similar to a portable XRF.	An X-ray generator, a filter to reduce background noise, optics, and a detector.	Requires an XRF core scanner to be positioned accurately above the sediment surface, provides rapid high-resolution (down to 1 mm) records of chemical composition on split sediment cores.	Offers fast, non-destructive closely spaced analysis of major, minor, and some trace elements in drill cores by scanning the surface of split sediment cores.
10	Core scanner based on LIBS technology	The laser-induced plasma emission is collected by achromatic lenses and the optical signal is then spectrally resolved by a spectrometer that covers 220 to 990 nm with the detection of intensity light at selected wavelengths by a CMOS detector.	The laser source, the spectrometer, the 2-axis drill core translation table, and the ablation chamber in a fully automated configuration.	LIBS core scanners work in the full 220–990 nm range and a camera that can read 1000 full frames per second.	It can be used for both high-resolution mineralogical imaging and low-resolution core scanning.
11	Core scanner based on IR hyperspectral technology	Hyperspectral imaging is a chemical imaging technique by reflectance spectroscopy to identify minerals based on their spectral response to infrared light.	A tray table for carrying the core wooden tray under the field-of-view of the imaging spectrometer and a sensor to cover the IR regions of the electromagnetic spectrum. The entire setting is installed in a transportable Container.	The mineral liberation, texture, and grain information can be provided by the scanning and mapping of drill core samples, acquires data from hundreds of meters of core per day without any sample preparation.	It helps in mineral identification and quantification of the entire borehole from small samples, with high resolution mineralogical information strategically selected throughout the deposit.

All these devices will have a rechargeable battery each, which will last up to 6 to 8 h of work.

4. Портативные наземные аналитические приборы.

Поскольку большая часть приповерхностных рудных месторождений уже выявлена, в настоящее время основное внимание уделяется поиску скрытого оруденения. Необходимы поисковые геохимические и др. технологии, которые позволяют прогнозировать глубоко залегающее оруденение для его последующего подтверждения дорогостоящим бурением.

В настоящее время данные дистанционного зондирования (ДДЗ) предоставляют информацию о геологических структурах и закономерностях изменения минералов, по которым можно определить потенциальные районы для поисков. Мультиспектральные и гиперспектральные датчики играют большую роль в прогнозно-металлогенических исследованиях, поскольку они могут охватывать большие площади.

Методы геостатистического анализа коренных пород и донных отложений успешны при определении фоновых и пороговых значений и идентификации рудных аномалий. Исследования показали, что подземные воды являются важной средой для геохимических поисков различных типов минерализации, включая PGE, золото, уран и др.

Современные портативные аналитические устройства (обычно легче 2 кг) с успехом используются в полевых условиях. Некоторые из наиболее важных портативных аналитических методов, используемых для определения минералов-индикаторов и элементов-навигаторов, рассмотрены ниже.

4.1. Макроспектроскопия в видимом и инфракрасном диапазоне.

Гиперспектральные снимки (HSI) или отражательная спектроскопия с использованием полевой портативной спектроскопии в видимом–ближнем инфракрасном–коротковолновом инфракрасном диапазоне (Vis-NIR-SWIR) являются ценным инструментом при поисках. Инфракрасная спектрометрия используется для определения видов минералов, минерального состава и кристалличности некоторых распространенных глинистых, карбонатных и сульфатных минералов, присутствующих в образцах горных пород. Эта технология измеряет длины волн инфракрасного излучения, поглощаемого различными химическими связями, для идентификации минералов, присутствующих в образце. Каждый из целевых минералов имеет характерную картину ИК-поглощения, с помощью которой минерал может быть идентифицирован в дополнение к химическим изменениям и степени кристалличности минералов. Эти функции могут помочь в интерпретации характера исследуемой минеральной системы. Метод дистанционного зондирования применяется с аэро- и космических платформ для картографирования широкого спектра геологических объектов на больших площадях. В то время как спутниковые или аэро- платформы полезны для регионального картографирования, наземные и беспилотные приборы могут анализировать структурные и минералогические данные обнажений с точностью до миллиметра. Современные приборы могут охватывать коротковолновый инфракрасный (SWIR) и тепловой инфракрасный (TIR) диапазоны.

На фото 1 представлен портативный спектрометр UV–Vis–NIR (диапазон 250-2500 нм), используемый для полевой геологии. Эти полевые спектрометры с мощными датчиками позволяют собирать данные в широком спектральном диапазоне и предоставлять информацию

о содержании и пространственном расположении руд и минералов-навигаторов в керне, ручных пробах и обнажениях с точностью до миллиметра на небольших участках.



Фото. 1. Портативный спектрорадиометр для полевой геологии в УФ–видимом и инфракрасном диапазоне

Так, например, литийсодержащие пегматиты в Уисе, Намибия были идентифицированы с помощью гиперспектральной визуализации минерализованных обнажений. Позже они были подтверждены данными керна, полученными в результате рентгеноструктурного анализа и измерений LIBS. Многие из измененных минералов, таких как кварц, адуляр, хлорит, иллит, кальцит и пирит, могут быть идентифицированы только с помощью рентгеновской или вихревой спектроскопии отражения. Анализы спектроскопией отражения в основном проводятся в полевых условиях с использованием портативных приборов непосредственно на образце породы, что позволяет собирать большие наборы данных из близко расположенных образцов и не требует подготовки образца, в отличие от рентгенографии. Рентгеновская спектроскопия позволяет обнаруживать более широкий спектр минералов; с другой стороны, вихревая спектроскопия является очень быстрым и недорогим методом и позволяет собирать большие наборы данных из близко расположенных образцов, что невозможно с помощью рентгеновской спектроскопии.

Например, спектры VNIR-SWIR мусковита/белой слюды могут использоваться для идентификации различных редкоземельных минералов (рис. 2).

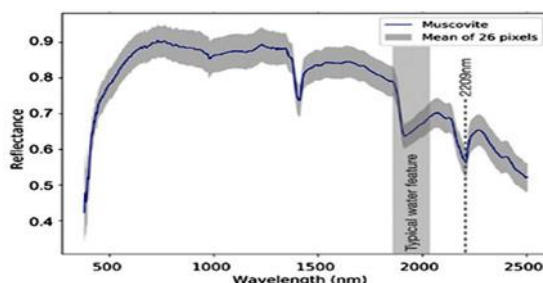


Рис. 2. Спектры VNIR-SWIR мусковита (белой слюды).

Неодим (Nd) обладает одними из наиболее выраженных характеристик поглощения среди РЗЭ и, следовательно, может использоваться в качестве ключевого элемента-навигатора для определения общего количества РЗЭ. Nd обладает характерными свойствами поглощения в

видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (VNIR) электромагнитного спектра при 580, 750 и 800 нм. Были проведены исследования по РЗЭ с использованием инновационной и неинвазивной гиперспектральной методологии на основе БПЛА, продемонстрировав прямое картографирование РЗЭ.

С помощью недорогой системы гиперспектральной визуализации на базе смартфона, которая может преобразовывать стандартную камеру смартфона в гиперспектральный датчик с видимой длиной волны, был получен набор данных о пепловом туфе с полосами текучести обсидиана, четко выделив отдельные полосы текучести с ключевой характеристикой отражения серы при длине волны около 500 нм.

При поисках лития двумя основными минералами-навигаторами являются лепидолит и сподумен (табл. 1). Образец может быть идентифицирован как лепидолит с отчетливыми особенностями при 580, 2190 и 2340 нм. Сподумена может демонстрировать особенности поглощения при 550, 1980 и 2320 нм с помощью NIR-полевого спектрометра, охватывающего диапазон 350-2500 нм.

Спектроскопия почвы с помощью портативных приборов также сводит к минимуму количество образцов, собираемых для лабораторных исследований, которые также требуют обширных процедур предварительной обработки, таких как сушка и измельчение. Спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона позволяет определить кристалличность отдельных минералов (глинистые минералы, хлорит, серпентин и т.д.), содержащих гидроксисиликатные минералы (эпидот, амфибол и т.д.), сульфатные минералы (алунит, пирит, калиевые квасцы, гипс и т.д.) и карбонатные минералы (кальцит, доломит и т.д.) в слоистом силикате. Портативный спектрометр ближнего инфракрасного диапазона возможно использовать для получения характерных спектров измененных минералов и установления взаимосвязи между измененными минералами и рудой.

Портативный инфракрасный спектрометр с преобразованием Фурье (FTIR). В целях поиска ценных минералов и получения информации о распределении полезных ископаемых был разработан еще один недорогой и быстрый метод, называемый портативным инфракрасным спектрометром с преобразованием Фурье (FTIR), который основан на поглощении света из спектра источника света. Первый портативный инфракрасный спектрометр с преобразованием Фурье (FT-IR) размером с портфель был представлен компанией SensIR примерно в 2000 году. ИК-спектроскопия поглощает монохроматический ИК-свет за один раз и рисует спектр, тогда как в FTIR мультихроматический (луч света нескольких частот) учитывает суммарное поглощение света и распределяет его для создания спектра с помощью FTIR. Для спектрального анализа используется дисперсия или

преобразование Фурье. FT-IR - это более быстрый, эффективный и неразрушающий метод, который предоставляет информацию о химическом составе, минералогических и структурных особенностях геологического образца и практически не требует подготовки образца. В общем случае минералогические методы могут применяться к кристаллическим, некристаллическим, органическим и неорганическим материалам. Ближний ИК-диапазон (pNIR) или средний ИК-диапазон (pMIR) электромагнитного спектра могут использоваться для определения присутствия определенных полезных ископаемых путем идентификации особенностей в проходящем или отраженном спектре. На фото 3 представлен коммерческий портативный ИК-спектрометр и его принципиальная схема.

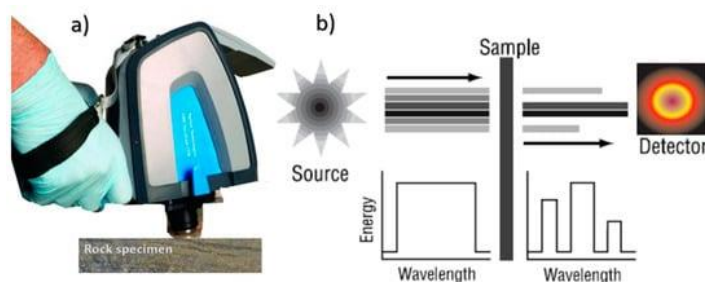


Фото 3. (a) Портативный ИК-спектрометр, (b) принципиальная схема.

Эти приборы обычно работают с рассеянным отражением, но ослабленное полное отражение (ATR) также может использоваться для точечных поверхностных измерений для идентификации различных минералов, а также органических соединений. Ближний инфракрасный диапазон (NIR), а также гиперспектральный диапазон от видимого до ближнего инфракрасного диапазона (VNIR) рассматривались в качестве потенциальных инструментов для сортировки руд. Известно, что силикатные, карбонатные и гидроксидные минералы активны в среднем инфракрасном диапазоне (MIR) и демонстрируют уникальную отражательную способность благодаря фундаментальному растяжению и колебательным движениям. FTIR - это быстрый, неразрушающий и недорогой метод, который не требует пробоподготовки (образцы измельчаются и гранулируются перед измерением спектров отражения) или вообще не требует пробоподготовки, а полученные данные модальной минералогии часто дополняют элементный анализ с помощью pXRF и LIBS для идентификации и разграничения целей.

ИК-спектроскопия в добыче меди. Портативная ИК-спектроскопия была использована для измерения минералогии образцов керна из м-ний Cu в Демократической Республике Конго. Тип минеральных сообществ и минералогия вмещающей породы влияют на процесс извлечения (выщелачивание или флотация), которые используются для извлечения Cu и Co. Всестороннее понимание разнообразия минералогии и текстуры руд на месторождении важно для

оптимизации ресурсоэффективности и снижения технических рисков и воздействия на окружающую среду.

ИК-спектроскопия в известняковой промышленности. Учитывая, что в горнодобывающей промышленности в настоящее время основное внимание уделяется снижению затрат при одновременном улучшении качества руды, FTIR - это инструмент, который потенциально может помочь компаниям решить обе эти задачи. Изменения в характере инфракрасных спектров сильно зависят от изменений в минералогии, которая является ключевой входной переменной для разведки и добычи полезных ископаемых. Карбонатные породы в основном содержат карбонат кальция-магния ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) и карбонат кальция (CaCO_3), и они особенно используются в строительном секторе в качестве цементного сырья или используются в производстве удобрений. Их можно разделить на два доминирующих минерала: доломит ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) и известняк (CaCO_3) в форме кальцита, ватерита или арагонита. Успешно использовали FTIR, а также XRD для идентификации известняка из Чадаванки (Тахуа, Нигер).

Характеристика различных минералов в речном песке. Инфракрасная спектроскопия использовалась для идентификации различных минералов в образцах речного песка, собранных в реке Поннай, Тамилнад, Индия. ИК-пики, наблюдаемые для кварца, полевого шпата, каолинита, кальцита, гиббсита и органического углерода, были подтверждены методом рентгенографии, а также энергодисперсионной рентгеновской спектрометрией (SEM/EDS).

FTIR при разведке углеводородов. Несколько исследований продемонстрировали возможности ИК-спектроскопии для идентификации глинистых минералов в породах-коллекторах, неразрушающего экспресс-анализа химической структуры и распределения органического вещества в породах, включая изучение состава керогена и его зрелости в богатых органикой сланцах при региональной разведки нефти.

4.2 Радиометрические приборы.

Радиометрические или гамма-спектрометрические исследования широко используются при поисках, геологическом картографировании и радиационном мониторинге окружающей среды. Одним из наиболее значительных достижений в поисках урана стало развитие методов гамма-спектрометрии, выходящих за рамки ряда других применений, включая геотермальную разведку. Используя естественную радиоактивность элементов/изотопов (например, ^{40}K , ^{234}Th , ^{238}U), концентрации которых могут быть определены с помощью гиперспектральной гамма-спектрометрии ДДЗ, флуориметрия и других геохимических методов с помощью БПЛА и портативных приборов для картирования этих радиоактивных элементов в выбранных районах. Радиометрические методы способны обнаруживать эти

элементы на поверхности земли, в буровых скважинах и на обнажениях. Распространенными радиоактивными минералами являются уранинит, монацит, торанит, богатые рубидием полевые шпаты в гранитном пегматите, мусковит и сильвит в кислых магматических породах. В большинстве современных приборов счетчики Гейгера–Мюллера были заменены кристаллическими сцинтилляционными детекторами. Так, например, был использован калий в качестве элемента-навигатора наряду с магнитными данными для идентификации зон золоторудного оруденения, связанных с изменением К в восточно-понтійском орогенном поясе альпийско-гималайской системы. Месторождение характеризуется высоким уровнем измененных пород, окружающих залежи, которые обычно имеют отчетливую сигнатуру радиоэлементов, важную для ГРП. Портативные гамма-спектрометрические приборы также хорошо подходят для исследований по разведке РЗЭ, поскольку руды РЗЭ могут содержать следы аномальных концентраций радиоактивных элементов К, U и Th.

pXRF. Портативное рентгеновское излучение (РФА) становится важным инструментом для геохимических исследований. Описаны инструментальные разработки, а также общие области применения РФА-приборов, когда образец бомбардируется пучком рентгеновских лучей с размерами пятен от 0,5 до 2 мм, электроны вытесняются из внутренней оболочки атома, и вакансия из внутренней оболочки затем замещается электроном из внешней оболочки. Когда этот электрон заполняет вакансию во внутренней оболочке, он высвобождает энергию в виде вторичной рентгеновской флуоресценции, которая характерна для каждого элемента. Измеряя эти характерные излучения на определенной длине волны или энергии, можно определить элементы (как качественно, так и количественно), присутствующие в образце. Обнаружение и измерение излучаемых рентгеновских лучей выполняются двумя различными способами: (а) рентгенодисперсионное излучение с дисперсией по длине волны (WD-XRF) использует кристалл, своего рода дифракционную решетку для диспергирования спектра в соответствии с длиной волны рентгеновского излучения — скорее как призма, которая расщепляет видимый свет на цвета радуги, и (б) энергодисперсионное рентгенодисперсионное излучение (ED-XRF) напрямую определяет энергии различных рентгеновских лучей в спектре.

Портативный XRF (pXRF) - это миниатюрная версия ED-XRF. Принципиальная схема, показывающая конфигурацию обычного портативного XRF-анализатора, представлена на рисунке 5.

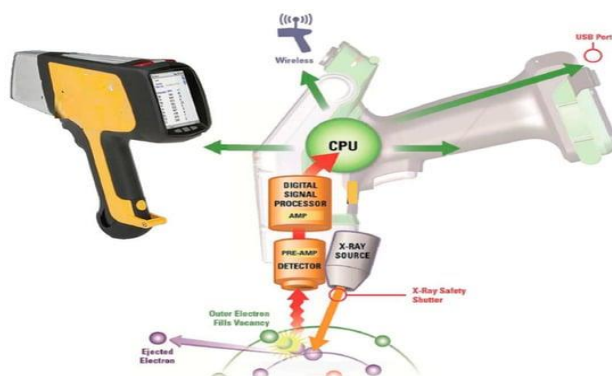


Рис. 5. Принципиальная схема портативного рентгенофазового анализатора.

Портативный рентгеновский аппарат прост в использовании, его можно легко переносить и управлять им одной рукой. Он может обеспечить неразрушающий химический анализ более 30 элементов с концентрацией от примерно 10 мкг/г до 100% менее чем за минуту с пределом обнаружения от 5 до 10 мкг/г в полевых условиях (табл. 3).

Табл. 3.

**Пределы обнаружения (LOD) элементов (в мкг/г)
с помощью портативного рентгеновского излучения.**

Element.	pXRF LOD	Element	pXRF LOD	Element	pXRF LOD	Element	pXRF LOD
Ag	<10	Cr	<10	Pb	<0.05	Ti	<10
As	<5	Cu	<10	Rb	<5	V	<10
Au	<10	Fe	<10	S	<200	W	<10
Ca	<50	K	<50	Sn	<20	Y	<5
Cl	<200	Mn	<10	Sr	<5	Zn	<5
Co	<10	Mo	<5	Th	<5	Zr	<5

На рисунке 6 показан спектр серпентинитовых и метабазальтовых пород, полученный портативным рентгенофазовым излучением.

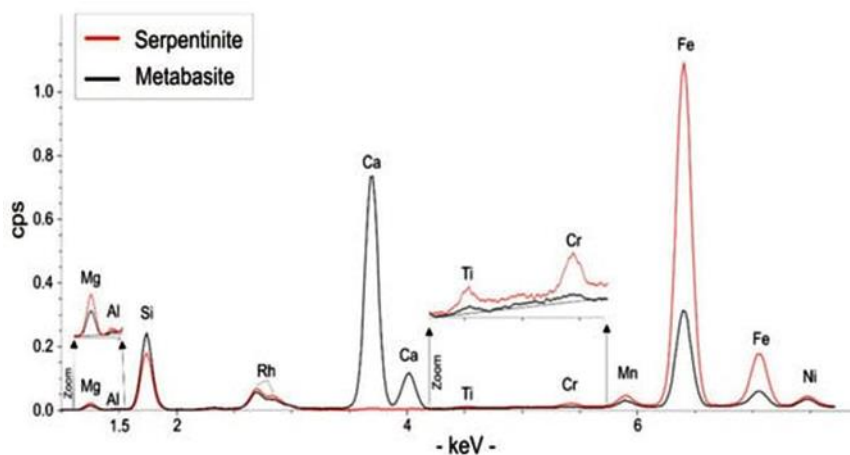


Рис. 6. Портативные рентгенофазовые спектры серпентинита и метабазальтовых пород.

Последние разработки в микроэлектронике и усовершенствованные чипы помогли резко уменьшить размеры специализированных компонентов сложных аналитических приборов. Технология получения триболюминесцентного рентгеновского излучения устранила

высоковольтный источник питания и оказывает глубокое влияние на современные технологии рентгеновского излучения, позволяя снизить стоимость и размеры в масштабах, невозможных при использовании обычных технологий. Эти достижения сделали приборы pXRF нового поколения очень мощными. Некоторые важные функции включают быстрый сбор данных по большому количеству образцов и повторный анализ, получение более высокой плотности данных, совместимой с геостатистикой, более низкие пределы обнаружения для нескольких элементов, большинство межэлементных помех автоматически корректируются для различных элементов, и этим приборам не требуется лабораторная среда для надлежащего функционирования. Однако pXRF имеет ограничения, такие как матричные помехи для элементов, которые могут быть измерены; например, помехи от РЗЭ на переходных элементах могут влиять на данные, которые не могут быть полностью исправлены.

Рентгеновский аппарат способен анализировать элементы от Mg до U, и его использование при поисках REE, PGE, Nb, Zr и Ta достигло разной степени успеха. Среди ряда преимуществ pXRF важна возможность проведения измерений на месте с минимальной подготовкой образца. Измерение проб в полевых условиях часто требует определенной пробоподготовки, такой как подготовка плоской гладкой поверхности образца каждый раз перед получением данных для обеспечения точности, повторяемости и надежности. Однако, когда подготовка образцов невозможна, для получения некоторых потенциальных средних значений необходимы многократные сканирования с несколькими точками данных. Также имеются мини-пульверизаторы и наборы для гранулирования, измельчения небольших количеств образцов и изготовления спрессованных гранул для проведения измерений на месте.

Методы разведки pXRF были опробованы в северной Финляндии с использованием поверхностной обработки в качестве материала для отбора проб золота, Ni и PGE с использованием элементов-следопытов (Al, Fe и Mg). Анализы pXRF некоторых основных (Ca, Fe) и большинства неблагородных металлов (таких как As, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) хорошо коррелируют с геохимическими данными анализа с использованием царской водки по тем же элементам. Распределение этих элементов было сопоставимо с литологическими изменениями в подстилающих породах, демонстрируя полезность pXRF при сборе геохимических данных для отслеживания источников многокомпонентной минерализации. Для исследований по поискам золота методом pXRF вместо Au используются элементы-индикаторы, такие как As, Bi, Cu, Mn и Sb. pXRF может давать данные, хорошо коррелирующие с лабораторным анализом, при использовании методики для поисков руд Ta-Nb-Sn-W.

pXRF при поисках Li. Хотя pXRF не может определить Li, он может точно определять несколько элементов-навигаторов лития, таких как Cs, Ta, Nb, Sn W, Km и Rb, и, таким образом,

может быть чрезвычайно полезен при исследованиях пегматитов методом LCT. Был использован pXRF для получения внутренне согласованного геохимического набора данных элементов-следопытов LCT (Li, Cs, Ta, Nb, Be, Sn, W, K и Rb) для эффективной стратегии анализа пегматитов LCT в Новой Зеландии с целью выявления перспективных пегматитов на участке площадью 1831 км².

pXRF при разведке PЗЭ. Осадочные месторождения фосфатов являются основными источниками сырья для производства фосфорсодержащих удобрений. Однако в последнее время эти месторождения фосфатов были идентифицированы как потенциальные источники PЗЭ. Портативное рентгеновское излучение использовалось на первом этапе ориентировочной съемки отложений фосфатов, содержащих PЗЭ, на юго-востоке Британской Колумбии, Канада. Полученные данные были использованы для выявления зон фосфатных пород, обогащенных PЗЭ. С помощью pXRF также можно контролировать концентрации урана и тория, чтобы исключить зоны с высокой концентрацией этих элементов для промышленности удобрений, поскольку эти радиоактивные элементы потенциально могут накапливаться в сельскохозяйственных почвах и даже в конечном итоге попадать в продовольственные культуры в высоких концентрациях.

Исследования по разведке золота и PGE с использованием pXRF. Было обнаружено, что портативное рентгеновское излучение является мощным инструментом для исследований по поискам золота и PGE. Определение низкой концентрации желаемых элементов в образцах руды обычно является сложной задачей из-за матричных эффектов и перекрытия пиков. Однако в нескольких случаях наблюдается хорошая корреляция между данными, полученными с помощью pXRF в полевых условиях, и лабораторными данными, полученными с помощью общепринятых методов, таких как ICP-MS. Хотя приборы pXRF могут плохо работать для обнаружения низких концентраций драгоценных металлов, они могут быть превосходными для обнаружения некоторых элементов-следопытов, таких как Cu, Mg и Ni. pXRF был успешно использован для выявления аномальных зон PGE и Au (целевых элементов) с использованием элементов-следопытов Ni и Cu при разведке месторождения PGE Пиланесберг, комплекс Бушвелд, Южная Африка. Шестьдесят три образца керна были проанализированы с использованием как pXRF, так и лабораторных методов. В этих образцах содержание Pt <8 мкг/г, Pd <5 мкг/г и Au <1 мкг/г, которые не были обнаружены методом pXRF; однако содержание Ni и Cu достигает 6540 и 3560 мкг/г соответственно, которые были легко обнаружены тем же методом. Эти элементы демонстрируют положительную корреляцию с драгоценными металлами, указывая на то, что их можно использовать в качестве следопытов. Был разработан автоматизированный энергодисперсионный рентгеновский аппарат, который

установил предел обнаружения золота <1 мкг/г. Это выгодно по сравнению с методами огневого анализа.

Портативный рентгеновский дифракционный спектрометр (pXRD) предоставляет надежные, качественные и количественные минералогические данные практически в режиме реального времени в полевых условиях. pXRD - это более точный метод идентификации, который позволяет количественно оценить более широкий спектр минералов по сравнению со спектроскопией вихревого отражения или рамановской спектроскопией.

На рисунке 7 изображены принципиальная схема и прототип портативного метода ED-XRD с обратным отражением.

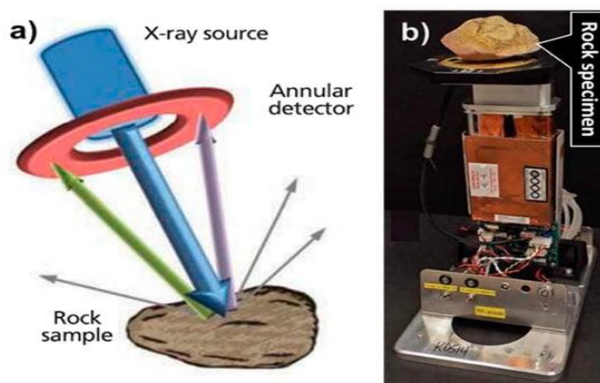


Рис. 7. Принципиальная схема портативной системы EDXRD с обратным отражением (а) и фото (б).

Рентгеноконструктивная интерференция монохроматических рентгеновских лучей и кристаллического образца основана на законе Брэгга. Когда монохроматический рентгеновский пучок проходит через кристаллическую решетку образца, часть излучения дифрагирует под углом, известным как угол Брэгга, и достигает детектора, который равен половине угла падающего излучения. Каждый кристаллический материал имеет характерную атомную структуру, которая видна на рентгенограмме. Положения пиков в рентгеновском спектре предоставляют информацию о расстоянии между элементарными ячейками, а также о их симметрии, что имеет решающее значение для идентификации кристаллов. Портативный рентгеновский аппарат позволяет быстро идентифицировать различные элементы в полевых условиях, но может анализировать только порошкообразные образцы горных пород. Этот метод позволяет легко различать минералы и распознает их из-за различий в кристаллической структуре. Для прибора требуется всего около 15 мг порошкообразной пробы, и подготовка пробы также очень проста; точные данные о минералах можно получить за несколько минут. Из полученных дифрактограмм можно идентифицировать минералы в исследуемых образцах горных пород.

Современные рентгеновские приборы компактны по размерам, быстры, точны и способны выполнять автоматический анализ, предоставляя информацию при поисках, разведке, добыче и обогащении полезных ископаемых.

pXRD может определять количество Li-содержащих минералов в LCT-пегматитах. На рисунке 8 показана рентгенограмма литиевого минерала петалита (95% кварца и 5% петалита).

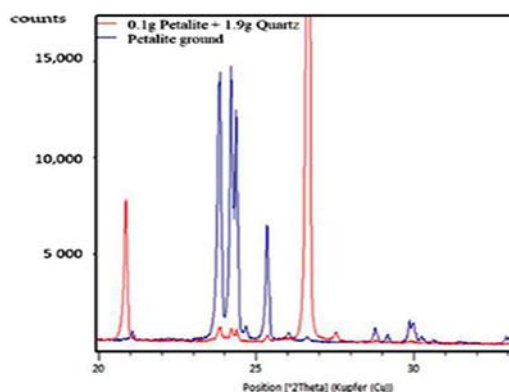


Рис. 8. Рентгенограмма лития, петалита (95% кварца и 5% петалита).

Было рассчитано содержание лития на основе количественного минералогического анализа с использованием pXRD, что привело к быстрому и надежному определению содержания лития в рудах и концентратах. Благодаря ряду усовершенствований в инструментальных компонентах, таких как рентгеновские трубки, детекторы, процессоры и более мощные программные пакеты, pXRD превратился в высоконадежный качественный и количественный минералогический инструмент с потенциальным применением при поисках, разведке и добыче полезных ископаемых.

4.3 Устройства pLIBS.

В последние годы наблюдается всплеск применения технологии LIBS в результате разработки более компактных, даже портативных систем, которые позволяют использовать их в полевых условиях. pLIBS - это новейший недорогой портативный инструмент для геохимических поисков, который может обеспечить быстрый анализ состава широкого спектра материалов, включая все виды геологических образцов, на месте с точностью ~ 5-20% RSD. Технология LIBS использует короткий и высокоэнергетический лазер для абляции поверхности образца, создавая плазму из небольших количеств аблируемого материала. Взаимодействие сфокусированных лазерных импульсов с материалом образца создает плазму, состоящую из ионизированного вещества с кратерами лазерной абляции диаметром порядка 30-400 мкм, в зависимости от длины волны лазера, длительности лазерного импульса, химического состава материала мишени и матричных эффектов. Чрезвычайно высокие температуры в плазме (>100 000K) вызывают диссоциацию, распыление и ионизацию удаляемого материала, а в процессе охлаждения характерное атомное излучение может обеспечивать “спектральные сигнатуры”

химического состава материала образца (твердое, жидкое или газообразное состояние), включая более легкие элементы, такие как Be и Li, что невозможно при pXRF. Каждый элемент периодической системы Менделеева создает уникальный для себя спектральный пик LIBS, что позволяет проводить одновременный многоэлементный анализ большинства элементов периодической системы, который может предоставить информацию о химическом составе минерала или породы, а также о геологических процессах, связанных с его образованием. Используя детектор для измерения уникальных характеристик излучаемого света, можно определить, какие элементы присутствуют в образце. Это практически неразрушающий метод, поскольку во время анализа из образца аблируется и удаляется лишь незначительное количество пробы. LIBS также имеет возможность предоставлять профили глубины. Принципиальная схема LIBS показана на рисунке 9, которая включает лазерный источник, спектрометр (обычный диапазон, 200-1100 нм с разрешением 0,1 нм) и усиленный ПЗС-детектор (ICCD) или КМОП-детекторы с минимальным временем срабатывания ~ 1 миллисекунда.

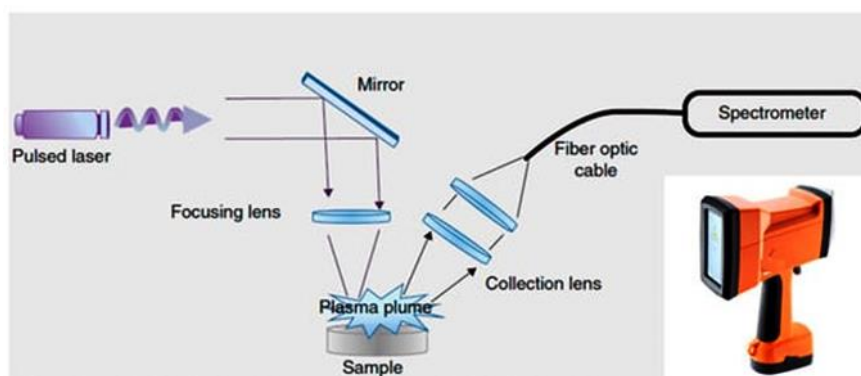


Рис. 9. Принципиальная схема работы портативных библиотек, с фотографией прибора.

Nd: YAG (иттриево-алюминиевый гранат) является наиболее распространенным лазером, используемым для pLIBS, из-за его относительно высокой эффективности и хорошей теплопроводности. Образец может быть прямым образцом породы или порошкообразной гранулой, как в случае лабораторного рентгеновского излучения, а толщина образца должна составлять не менее 40 мкм (соответствует обычным тонким срезам горных пород). Для геохимического анализа с помощью LIBS обычно предпочтительнее 193-нм эксимерные лазеры и 213-нм Nd: YAG-лазеры наносекундной длительности. pLIBS способен проводить качественный, полуколичественный и количественный анализ большинства элементов периодической системы. Пределы обнаружения обычно находятся в диапазоне низких мкг/г (рис. 10) для большинства элементов периодической системы.

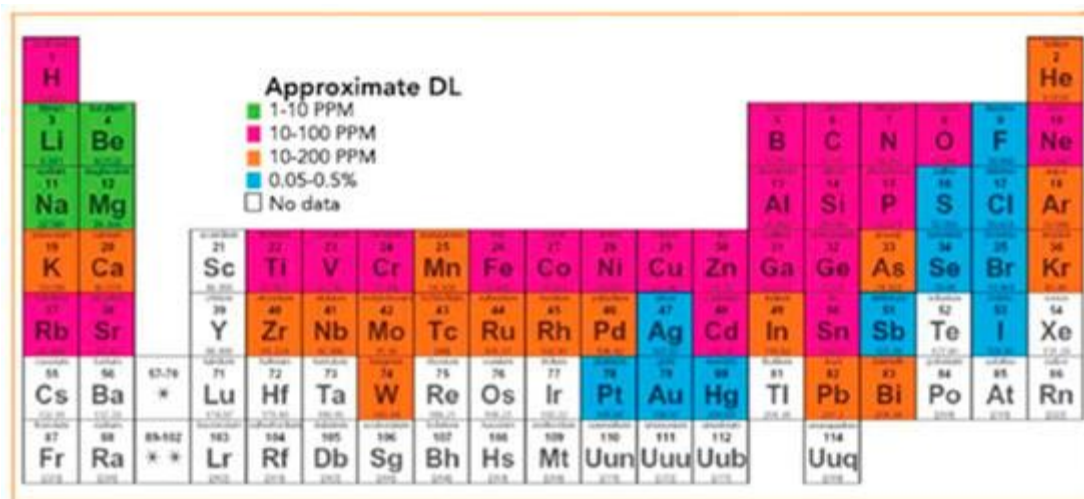


Рис. 10. Пределы обнаружения различных элементов системы LIBS.

Однако пределы обнаружения сильно зависят от типа лазера, спектрометра и матрицы образца, используемой для анализа. Например, более высокие абсолютные пределы обнаружения могут быть получены при использовании фемтосекундных лазеров, их высокая стоимость затрудняет их использование в портативных приборах LIBS, а фемтосекундные лазеры обычно используются только в лабораторных приборах. Типичный спектр LIBS во всем диапазоне длин волн, полученный для различных минералов, богатых Li (рис. 11).

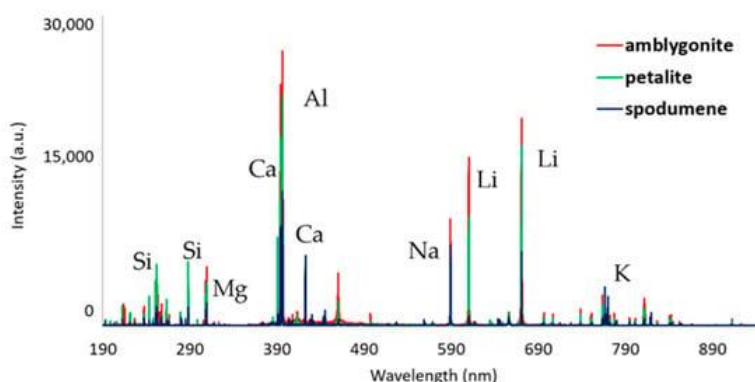


Рис. 11. Спектры LIBS во всем диапазоне длин волн для различных минералов, богатых Li.

Отчетливо видны отдельные пики выбросов различных элементов. В большинстве случаев твердые образцы могут быть непосредственно проанализированы LIBS без какой-либо предварительной обработки. Однако иногда для получения точных и достоверных данных требуется минимальная подготовка образца. Это может заключаться в простом механическом отделении исследуемой порции, резке и полировке для получения доступа к однородному участку для отбора пробы. Благодаря этим эксплуатационным характеристикам LIBS обладает широким потенциалом для использования при поисках, оценке и в целом для ГРП.

pXRF не может измерять элементы легче Al ($Z=13$), в то время как для pLIBS такого ограничения нет. Этот метод особенно полезен для анализа легких элементов с низкой энергией

ионизации (Mg, Na, C, B, Be и Li), некоторые из которых являются важными целевыми элементами, а также элементами-навигаторами при поисках.

Таким образом, эти два аналитических метода дополняют друг друга при геохимическом анализе. pLIBS также может выполнять анализ распределения минералов и элементов в образце, когда анализатор настроен на выполнение растрового рисунка с небольшими шагами. Карты элементов могут быть созданы для различных элементов путем объединения площади пика, измеренной для конкретного элемента для каждого измеренного физического местоположения.

Измерения РЗЭ иногда затруднены из-за слабых линий излучения, но недавно был разработан новый тип системы LIBS без встроенного временного стробирования, использующий лазерный луч Nd-YAG в качестве источника возбуждения и оптическую детекторную систему с высоким временным разрешением и компактным недорогим оптическим многоканальным анализатором (ОМА). Практические результаты анализа нескольких типов образцов, включая геологические материалы, были обнадеживающими как в лабораторных, так и в полевых портативных библиотеках для поисков с помощью быстрых, качественных и количественных геохимических анализов.

pLIBS для определения золота. Портативные устройства LIBS могут использоваться для быстрого анализа золота на месте, тем самым служа инструментом принятия решений на месте. Лучшим элементом-следопытом для отслеживания золотой минерализации является само золото; поскольку оно плотное, химически стабильное и его легко обнаружить в продуктах эрозии золоторудных систем (т.е. в россыпном золоте). Действительно, отбор проб дренажных отложений, часто первый шаг в стратегии поисков золота, заключается в определении содержания серебра (Ag) или его минеральных включений на линии наиболее интенсивного излучения при длине волны 546,58 нм, чтобы установить связь между вторичным (россыпным) и его потенциальным первичным месторождением. Результаты продемонстрировали, что можно различать отдельные группы золота в концентратах/золотых слитках, чтобы проследить происхождение золота из золоторудных районов Французской Гвианы, пострадавших от незаконной добычи. Это делается путем выполнения анализа основных компонентов (PCA) на базе данных, полученных по другим элементам, обычно связанным с самородным золотом, таким как Cu, Zn, Ag, Pb, As, Se, Sb, Sn, Hg и Te. Эта функция pLIBS имеет некоторые преимущества перед лабораторной лазерной абляцией ICP-MS (LA-ICP-MS) для отслеживания незаконной добычи золота в дополнение к ряду других преимуществ, таких как меньшая стоимость, скорость и удобство, чем при лабораторной лазерной абляции ICP-MS. Такие исследования также помогают различать источники золота и потенциально дают представление

о геохимических процессах, протекающих во время формирования золоторудных месторождений. Получен практический предел обнаружения 0,75 мкг/г в золотосодержащих породах, а также в образцах керна.

pLIBS при поисках Li. Поиски Li в основном проводятся на обнажениях пегматитов. LCT-пегматиты (содержащие Li–Cs–Ta) являются важным источником Li. Такие пегматиты могут иметь различную степень обогащения Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ga, Ta>Nb, B, P и F. Содержание Li в земной коре составляет 17 мкг/г, но концентрация в минерализованных породах может достигать ~ 3%. Хотя данные гиперспектральной визуализации (HSI), генерируемые портативными спектрометрами VNIR и SWIR, также использовались при поисках Li, pLIBS является идеальным геохимическим инструментом, поскольку это единственный метод, позволяющий измерять концентрацию Li в минералах, горных породах, почвах и рассолах в полевых условиях. На рисунке 11 представлены спектры LIBS трех богатых Li минералов, полученные во всем диапазоне длин волн.

Потенциал pLIBS был продемонстрирован в LCT-пегматитах Каролинского олово-сподуменового пояса (CTSB), расположенного в зоне сдвига Кингс Маунтин, США. pLIBS использовался для идентификации и количественного определения лития (предел обнаружения <100 мкг/г), измерения отношения K/Rb, картирования содержания лития и профилирования глубины. Использование pLIBS значительно сократило время, необходимое для получения требуемых геохимических данных в ходе программы ГПП на Li-пегматитах. Портативные библиотеки для определения Li использовали и для других второстепенных/следовых элементов, таких как Be, Rb и Cs, в редкометальных пегматитах при ГПП на Li.

4.4 Анализаторы μ Raman.

С момента разработки первого рамановского спектрометра достижения в области лазеров и детекторов расширили применение этого метода в нескольких областях, в т.ч. потенциал этого инновационного метода в получении геохимической и минералогической информации в том числе для поисков скрытого оруденения. Рамановская спектроскопия, наиболее эффективна для различения минералов группы серпентина, хризотила, антигорита и лизардита, которые имеют сходные рентгеновские картины. Рамановские спектрометры выдают информацию как о химическом составе, так и о структуре за одно измерение. Спектрометр μ Raman также является портативным аналитическим прибором неразрушающего действия, и из описанных здесь методов это единственный, который может идентифицировать как неорганические, так и органические соединения без необходимости какой-либо химической или механической подготовки образца.

На рисунке 12 представлена принципиальная схема современного портативного рамановского спектрометра.

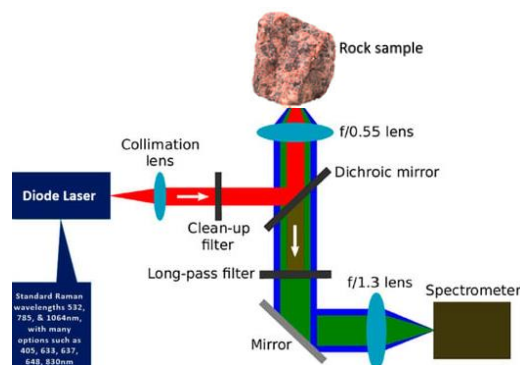


Рис. 12 Принципиальная схема системы рамановского спектрометра.

Видимый свет, УФ или ИК-излучение от лазерного источника подается через линзу и фильтр. Затем свет отражается зеркалом и фокусируется на образце через объектив микроскопа, где лазерный луч взаимодействует с молекулярными колебаниями, фононами или другими возбуждениями в системе, в результате чего энергия лазерных фотонов смещается вверх или вниз. Это изменение энергии известно как “эффект комбинационного рассеяния”, который обнаруживается детектором, предоставляющим информацию о колебательных режимах в системе (образце). Таким образом, спектр комбинационного рассеяния света можно рассматривать как отпечаток молекулы, и это, очевидно, неразрушающий метод. Типичное спектральное разрешение портативного спектрометра составляет около 10см^{-1} , что контрастирует с типичными значениями $1\text{--}2\text{см}^{-1}$ для полноценных лабораторных спектрометров. В настоящее время доступны миниатюрные приборы, которые можно взять с собой в поле. Визуальная идентификация, основанная на их специфических физических свойствах, таких как цвет, твердость и спайность, а также их кристаллическая структура, может быть относительно простой для некоторых минералов в полевых условиях, но для обнаружения многих распространенных порообразующих минералов необходимо специальное оборудование, такое как спектрометр pXRD или μRaman .

Используя портативный рамановский спектрометр, был обнаружен сложный минерал под названием аммонивольтаит, $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}^{2+}_5\text{Fe}^{3+}_3\text{Al}(\text{SO}_4)_{12}(\text{H}_2\text{O})_{18}$, в комплексном гидратированном сульфате летучей группы на поверхности Северо-Камбального геотермального месторождения, Камчатка, Россия. В другом примере рамановская микроспектроскопия с видимым возбуждением на длине волны 532 нм подтвердила биогенное присутствие цианобактериального мата, который оказал значительное влияние на формирование уникального месторождения Nb-REE Томтор, Россия.

На рисунке 13 показаны спектры комбинационного рассеяния некоторых распространенных тяжелых минералов различного происхождения.

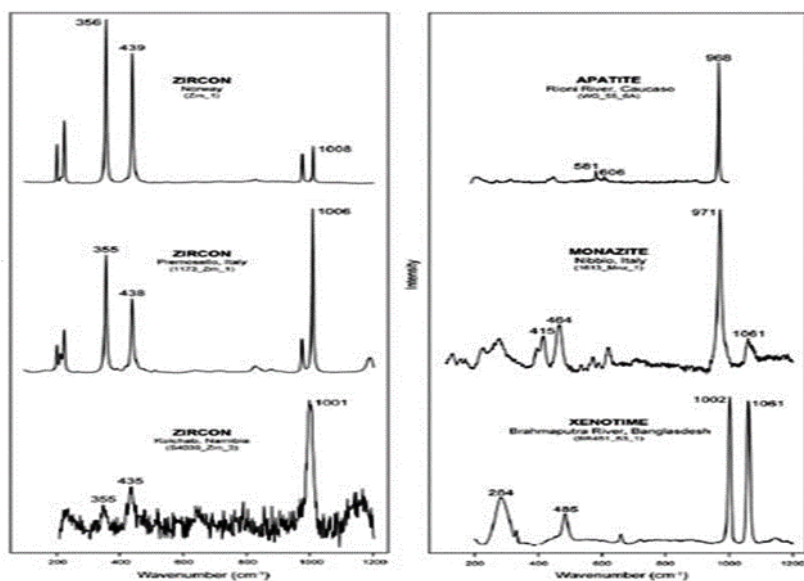


Рис. 13 Спектры комбинационного рассеяния некоторых распространенных тяжелых минералов.

Как правило, идентификация серпентиновых минералов в горных породах, проводимая с помощью сканирующей электронной микроскопии-энергодисперсионной спектроскопии (SEM-EDS) и просвечивающей электронной микроскопии (TEM), является очень дорогостоящей и требует сложных процедур пробоподготовки. Для выполнения этой задачи, возможно использовать менее дорогостоящую микро-рамановскую спектроскопию которая также не требует подготовки образца.

Карбонатные осадочные породы действуют как резервуары и могут быть вмещающими для многочисленных рудных месторождений в магматической, гидротермальной или осадочной среде. Были проанализированы спектральные особенности, связанные с идентификацией и изменением состава природных карбонатных минералов Ca-Mg-Fe-Mn со структурой кальцита (кальцит, анкерит, доломит, сидерит, родохрозит и магнезит), используя портативное рамановское устройство с возбуждающим лазером на длине волны 532 нм и портативный инфракрасный спектрометр с ATR (ослабленным полным отражением). Результаты продемонстрировали сильную корреляцию между Mg#, полученным с помощью портативного рентгеновского устройства, и положением полос как портативного рамановского, так и портативного ИК-спектрометра. Методы комбинационной и инфракрасно-вихревой спектроскопии взаимодополняющим образом были применены для идентификации четырех ключевых минералов с гидротермальными изменениями (пирофиллит, белая слюда, хлорит и алунит) *in situ*, которые распространены в эпитеермальных системах драгоценных металлов,

раскрыв потенциал этих методов для применения на других рудных месторождениях гидротермального происхождения.

4.5 Светодиодный флуориметр.

Портативный светодиодный флуориметр применяется в полевых условиях для непосредственного измерения концентрации урана в воде с пределом обнаружения 0,2 нг/мл, и этот метод может использоваться как в поисковых так и в экологических целях. Концепция основана на взаимодействии подземных вод с минерализованной зоной и выщелачивании микроэлементов/тяжелых металлов при благоприятных условиях pH-Eh. Подповерхностное пополнение подземных вод приводит к большей вероятности взаимодействия породы и воды с погребенной минерализацией по сравнению с поверхностными геохимическими методами. Светодиодная флуориметрия включает этапы возбуждения иона уранила в образце с использованием электромагнитной энергии подходящей длины волны и измерения затухания со временем фосфоресценции урана после прекращения падающего электромагнитного излучения. Выход флуоресценции варьируется для разных комплексов урана. Поэтому в пробу воды добавляется неорганический реагент Флуорен (реагент, усиливающий флуоресценцию -5% раствор пирофосфата натрия) в соотношении 1:10, чтобы преобразовать все комплексы в единый с одинаковым выходом флуоресценции. Измерение флуоресценции позволяет получить информацию о концентрации урана в образце. На рисунке 14 показана принципиальная схема работы светодиодного флуориметра.

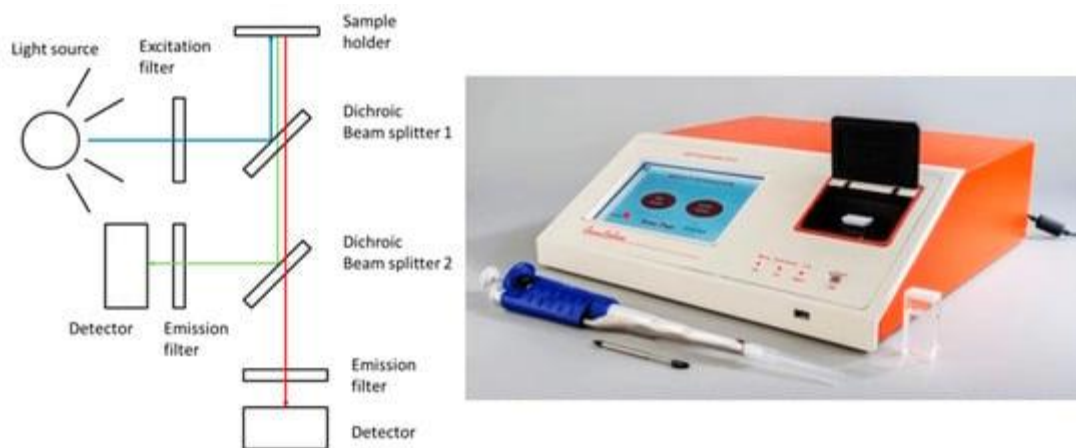


Рис. 14 Принципиальная схема и принцип работы светодиодного флуориметра.

Этот прибор может быть ценным инструментом при поисках урана с использованием гидрогеохимических методов, поскольку уран является лучшим навигатором для самого урана. Он имеет большой линейный динамический диапазон до 1000 нг/мл. Светодиодный флуориметр очень прочный, работает от батареи 12 В, подходит для полевых исследований и требует минимального обслуживания. Некоторые из хорошо известных портативных приборов,

таких как pXRF и pLIBS, не могут обнаруживать уран в очень низких концентрациях. С другой стороны, спектрометр μ Raman также можно использовать в поле для прямого измерения содержания урана в пробах воды, что обеспечивает обнаружение 0,2 нг/мл урана. Хотя светодиодная флуориметрия способна определять содержание урана в нг/мл и может быть полезна в качестве полевого метода, следует иметь в виду, что этот метод подвержен влиянию растворенных органических веществ, марганца, железа и высоких TDS. Для уменьшения этих помех могут быть выполнены соответствующие разведения.

5. Керновые сканеры.

Технологии сканирования керна основаны на рентгенофазовых, LIBS и ИК-гиперспектральных (HS) датчиках для получения петрофизических, минералогических и геохимических данных. Эти керновые сканеры обеспечивают быстрое сканирование и предоставляют аналитические данные высокого разрешения для выявления локальных зон минерализации и изменений с минимальной подготовкой образца или без нее на относительно высокой скорости. LIBS - это многообещающая технология для быстрого обнаружения таких зон в кернах, позволяющая детально интерпретировать генезис минерализации и распределение металлов на основе обширного набора данных. Метод LIBS намного быстрее других трудоемких методов, таких как электронно-зондовый микроанализатор (EPMA) и LA-ICP-MS.

Керновый сканер на базе LIBS использовался для исследования непрерывных изменений химического и минералогического состава хромитовой руды из руды Меренски Риф, комплекс Бушвелд, Южная Африка, с пространственным разрешением, от субмиллиметрового до метрового масштаба, и мог хорошо различать несколько сульфидов основных металлов, породообразующие и сопутствующие минералы.

Технология LIBS также страдает от матричных эффектов, как и любой другой метод спектроскопии. Похожие минеральные фазы будут давать похожие спектры LIBS с похожими матричными эффектами и классификацией; поэтому метод эффективен для обработки матричных эффектов в изображениях крупнозернистых геологических образцов. Методика может предоставлять полуколичественные данные об элементах для четко определенных фаз с помощью подсчета точек, а также определять Pt и Pd, когда они встречаются в самородках. Керновые сканеры, основанные на технологии LIBS, также показывали соотношения элементов, такие как Mg/Fe, Cr/Al и Ca/Na, которые были подтверждены EPMA на полированных срезах. Новый прибор LIBS может сканировать керн длиной около 4 м менее чем за 5 минут, создавать минеральные и химические карты с репрезентативным разрешением

и предоставлять оптические фотографии высокого разрешения. Таким образом, керновые сканеры, основанные на технологии LIBS, предоставляют информацию на месте, в режиме реального времени и способствуют успеху поисков.

Керновый сканер, основанный на технологии XRF (XRF-CS), первоначально предназначенный для неразрушающего определения химического состава кернов морских донных отложений на борту судов и в лабораториях на берегу, обеспечивает быструю запись химического состава с высоким разрешением (до 1 мм), что делает его применимым при поисках рудных месторождений.

Быстро модернизируются гиперспектральные (HS) ИК-сканеры для повышения надежности и эффективности каротажа керна при характеристике рудных месторождений. Например, были использованы гиперспектральные данные керна для количественной оценки оруденения месторождений Иберийского пиритового пояса VMS. В другом исследовании были использованы результаты гиперспектральных наблюдений кернов с использованием автоматизированных инструментов для получения геохимической информации при формировании прогнозных моделей оруденения золота, меди и железа.

6. Сравнение портативных приборов с лабораторными.

Поскольку качество данных, получаемых портативными приборами, зависит от полевых условий, состава породы/почвы и процедуры подготовки проб, образцы доставляются в лабораторию для более тщательного анализа, сравнения результатов и многократного подтверждения. Кроме того, протоколы обеспечения качества обычно требуют, чтобы несколько полевых образцов были разделены и отправлены в лабораторию для подтверждающего анализа. pXRF и pLIBS являются наиболее часто используемыми аналитическими методами для измерений на месте, лабораторные анализы обычно выполняются с помощью XRF, ICP-OES и ICP-MS. В благоприятных случаях полевые измерения и лабораторные анализы показывают хорошую корреляцию.

Эти подтверждающие анализы могут предоставить ценную информацию об эффективности полевой методологии, принятой с использованием портативных приборов. Сравнение данных pXRF в полевых условиях с лабораторными данными, полученными методом ICP-MS из фракции размером зерен <100 мкм, растворенной в царской водке, в исследованиях по Au, As и Cu показали хорошую корреляцию. Однако была получена слабая корреляция между pXRF и лабораторными данными для таких элементов, как Sb и Fe, что может отражать неоднородность образцов, а также неполное расщепление всех Fe-содержащих

минералов при сбраживании царской водкой для некоторых образцов (например, хромита) (рис. 15).

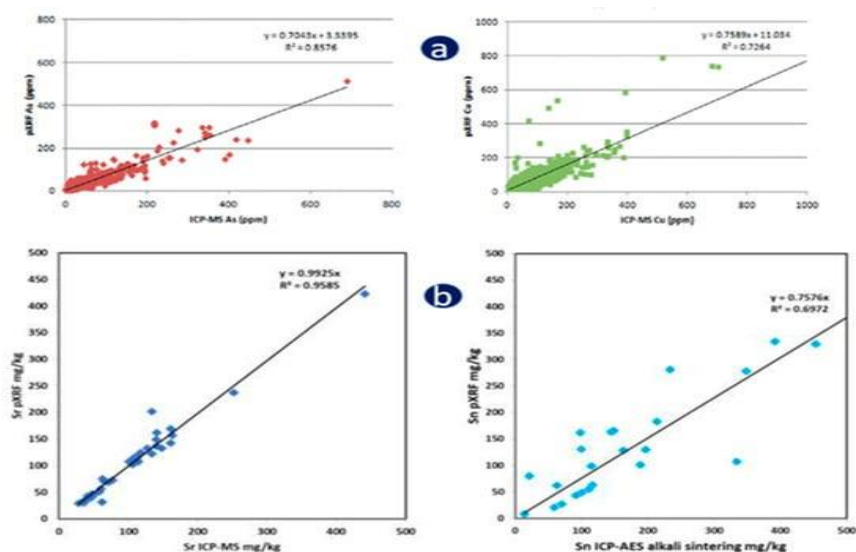


Рис. 15 Корреляция между полевыми данными (pXRF) и лабораторными данными (ICP-MS).

В таблице 4 представлено сравнение результатов РФА (в полевых условиях) и лабораторных результатов РФА для четырех эталонных образцов, доказывающее, что эти портативные приборы могут генерировать аналитические данные надежного качества.

Табл. 4.

Сравнение результатов РФА в полевых и лабораторных условиях для четырех эталонных образцов.

Description	Na (mmol/kg)	K (mmol/kg)	Ca (mmol/kg)	Li In (μmol/kg)
In situ determination by LIBS	470 ± 2	10.3 ± 0.2	9.7 ± 1.0	25 ± 9
In lab determined by ICP-AES	452	10.2	9.4	43.2

7. Проблемы с качеством данных и пути их преодоления

Традиционные лабораторные приборы, такие как WD-XRF, ICP-MS и рамановские спектрометры, обычно размещаются в стационарных помещениях с контролируемой средой и температурой. Портативные приборы, такие как спектрометры pXRF, pLIBS и μRaman, обычно используются в полевых условиях при переменной температуре и в условиях окружающей среды.

Например, Исландия предлагает широкий спектр природных условий, включая вулканически активные районы, обширные лавовые поля, геотермальные источники и обширные участки покрытой льдом. Для примера, были объединены методы pLIBS, pRaman и UV/VIS/NIR спектроскопии для характеристики минеральных комплексов, гидратированных компонентов и биомолекул в образцах горных пород и отложений, собранных на некоторых участках в вулканически активном районе Кверкфьель-Ватнайекюдль. Результаты, полученные в полевых условиях, не всегда совпадают с результатами, полученными в лаборатории по

нескольким причинам: (1) различия в окружающей среде, включая запыленность, (2) различия в температуре, (3) различия в подготовке образцов (геометрия образца, плотность, размер зерен и влажность) и (4) технические ограничения портативных приборов (например, чувствительность). Процедуры подготовки проб в лаборатории обеспечивают репрезентативность образцов, которая в некоторой степени может быть обеспечена с помощью сетки или нескольких измерений в полевых условиях. Таким образом, если эти аспекты полностью поняты и уделяется должное внимание тщательной подготовке образцов и соблюдению соответствующих процедур контроля качества, портативные приборы также могут предоставлять надежные данные в полевых условиях. В случае pXRF это поверхностный/приповерхностный метод, который, как предполагается, проникает на глубину от нескольких микрометров до нескольких миллиметров в зависимости от природы матрицы образца и измеряет только часть образца непосредственно перед окном. В ряде случаев с помощью pXRF и лабораторных приборов, таких как ICP-MS, можно получить сопоставимые данные по одним и тем же образцам для определенных элементов, таких как As, Cu и Pb (рис. 15). Однако для таких элементов, как Sb, согласие не было хорошим, поскольку концентрации Sb были близки к нижнему пределу обнаружения с помощью pXRF. Такой точности может быть достаточно при прогнозировании, а не поисках. Однако в других видах ГРП, таких как разведка и добыча требуется более тщательная подготовка образцов, калибровка приборов и протоколы контроля качества. При обнаружении необходимого элемента LIBS-сигнала обычно достаточно для идентификации, даже если образец не является строго плоским (для масштаба окна 3×4 мм). При проведении работ по спектроскопии μ Raman параметры инструмента, такие как точность фокальной плоскости, время экспозиции и условия окружающей освещенности в полевых условиях, могут влиять на получение и интерпретацию спектроскопических данных образцов. Химический и минералогический анализ кернов в режиме реального времени с помощью pXRF, спектрометра pFTIR, рентгеновского излучения и рамановского спектрометра является сложной задачей из-за состояния поверхности зерна и ее неоднородности. Исследование показало, что состояние поверхности оказывает некоторое влияние на результаты портативных приборов, также было показано, что мульти технологический подход был наилучшим для преодоления недостатков, связанных с вариациями текстуры зерна.

Ничто не заменит надлежащую подготовку образцов, протокол тестирования и соблюдение строгих протоколов обеспечения качества и контроля качества (QA и QC) использованием сертифицированных эталонных материалов с международной матрицей соответствия (CRM) для получения точных количественных данных. Эта методология сводит к минимуму влияние матрицы благодаря совместимости химических и физических

характеристик образцов и стандартов калибровки. Для уменьшения влияния матрицы могут быть использованы другие традиционные стратегии калибровки, такие как добавление стандарта (SA) и внутренняя стандартизация (IS). Чтобы свести к минимуму влияние элементов матрицы на конкретный элемент, анализируются соответствующие международные CRM и применяются поправочные коэффициенты для получения наиболее точных данных даже в полевых условиях. Используется лабораторный анализ коренных пород, репрезентативных образцов из изучаемой зоны и соответствующие матрицы международных CRM для получения поправочных коэффициентов при применении к данным PXRF, чтобы гарантировать их точность.

Была создана библиотека данных, состоящая из спектральной информации высокого разрешения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (350-1080 нм), которая имеет дело с эффектами перекрытия спектра и будет полезна для идентификации некоторых элементов, таких, например, как РЗЭ.

8. Выводы.

1. Методы геохимической аналитики при поисках рудных месторождений, как лабораторные, так и полевые, могут стать отличной системой, помогая обнаруживать оруденение при снижении затрат. В частности, разработка недорогих полевых портативных аналитических приборов, таких как портативные коротковолновые инфракрасные спектрометры (SWIR), pXRF, pXRD, pLIBS и спектрометры MR Man, за последние пару десятилетий позволила получать геохимическую и минералогическую информацию при проведении поисков, позволяя принимать решения в режиме реального времени с достаточной уверенностью. Преимуществами этих приборов являются: (1) быстрый анализ; (2) низкие затраты на приобретение и обслуживание по сравнению с лабораторными приборами; (3) работа от перезаряжаемых батарей; (4) отсутствие необходимости подготовки проб или ее незначительное количество; (5) GPS, Bluetooth, беспроводные компьютерные технологии, подключение к Интернету и дистанционное управление; (6) безопасность для оператора; и (7) простота эксплуатации.

2. Методы анализа In situ более полезны для успешных поисков и разведки рудных месторождений. Их можно использовать для анализа горных пород и почв различного состава без или с минимальной подготовкой образцов. Однако четкое понимание влияния матрицы чрезвычайно важно для получения оптимальных результатов. Применение многомерных методов может быть полезным, особенно для гетерогенных образцов.

3. Портативные LIBS - это один из немногих методов, который может обнаруживать литий, а также все галогены в полевых условиях. Текущие разработки в области анализа на месте вместе с надежными протоколами контроля качества повышают уровень доверия этим методам. Лазерные технологии постоянно совершенствуются за счет уменьшения размеров лазера и увеличения мощности импульса, а также благодаря улучшенной оптике. Ожидается дальнейший прогресс в создании новых портативных лазерных приборов в будущем

II. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ПОРТАТИВНОГО РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ [1].

1. Введение.

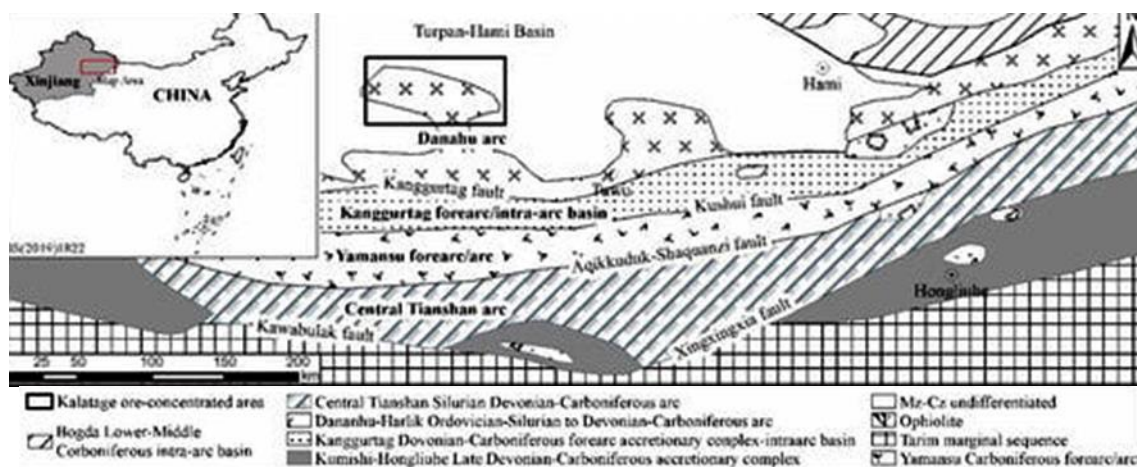
рXRF позволяет геологам качественно и полуколичественно определять концентрации различных элементов всего за десятки секунд, тем самым повышая эффективность и снижая затраты при геохимических поисках. Известно, что результаты рXRF варьируются в зависимости от времени обнаружения, а также типа и содержания воды в образцах. Предполагалось, что полученные данные имеют низкую точность, и по этой причине спектрометрия рXRF не находила широкого применения при поисках рудных месторождений. Однако относительная (т.е. относительно определенного порога), а не абсолютная концентрация элементов-индикаторов потенциально может предоставить ценную информацию о геохимических аномалиях для практической реализации поисковых проектов.

В этом материале для оценки концентраций элементов в выветренных коренных породах, золотых песках и аллювии использовался рXRF. Результаты сравниваются с данными лабораторного анализа, обсуждаются факторы их сходства и различия, а также оценивается применимость портативного рXRF в реальных проектах геохимических поисков.

2. Материалы и методы

2.1. Исследуемая территория и пробоотбор.

Территория исследования расположена в рудном районе Калатаге в горах Восточного Тянь-Шаня в Синьцзяне, Китай. В последние годы в районе было открыто несколько медно–золото–полиметаллических месторождений, в т.ч. медно-цинковое типа VMS, медно-золотые эпитермальные и медно–золотое порфировое (рис. 1).



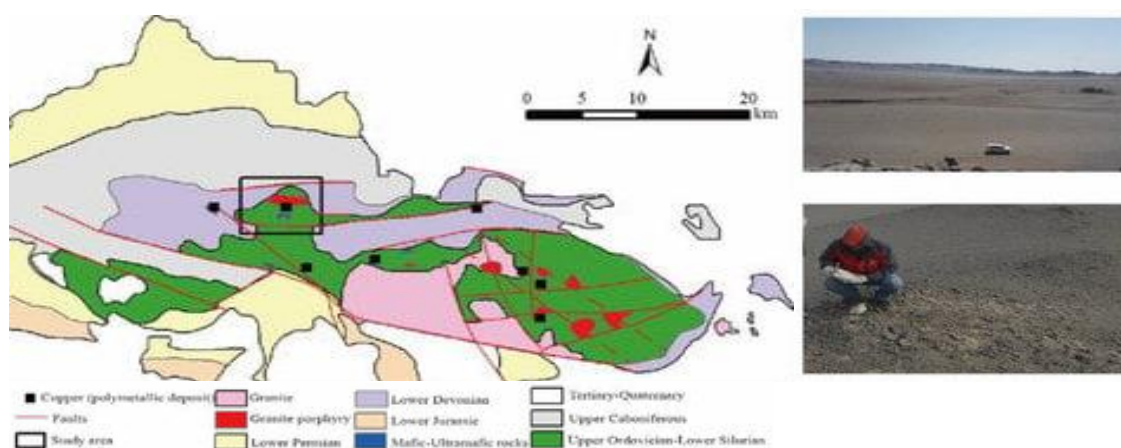


Рис. 1 Расположения участков исследования и типичный ландшафт (на фото).

Участок отбора проб находился примерно в 2 км от центра порфирового медно-золоторудного м-ния, которое расположено в пустыне Гоби, где широкие долины покрыты золовым песком и аллювием мощностью от нескольких сантиметров до метров. Выходы коренных пород – выветрены.

Было проведено опробование по тринадцати маршрутам север–юг, длина каждого из которых составляла приблизительно 5 км, с интервалами 200 м между местами отбора проб и 500 м между маршрутами.

2.2. Анализ *pXRF*.

Для анализа 316 образцов породы и каменного порошка использовали энергодисперсионный *pXRF* (Thermo Fisher Scientific Niton XL3t 950 GOLDD+; Уолтем, Массачусетс, США). Для анализа образцов горных пород из каждого образца случайным образом выбирался один кусок породы, время обнаружения устанавливалось равным 120с, и использовался режим «ДОБЫЧИ Cu–Zn». Для анализа образцов порошка горных пород все образцы горных пород были измельчены с диаметром частиц менее 75 мкм. Затем образцы были упакованы в полиэтиленовые пакеты, которые были протестированы на отсутствие загрязняющих веществ и помещены на мобильный испытательный стенд. Применялись четыре максимальных времени обнаружения (40, 80, 120 и 200с) в условиях режима «ДОБЫЧИ Cu–Zn». Каждый из четырех встроенных фильтров-возбудителей в спектрометре *pXRF* требовал четверти общего времени обнаружения для одного образца.

Лабораторный анализ. Для точного определения концентраций элементов в образцах все 316 образцов горных пород были переданы в лабораторию Бюро геологоразведки цветных металлов в Синьцзяне. Образцы измельчали до 75 мкм или менее, а затем анализировали в соответствии с методами, перечисленными в таблице 1.

Аналитическое оборудование для измерения концентраций 14 элементов.

Element	Analytical method
Cd, Co, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn	ICP-MS ^(a)
As, Hg, Sb, Ti	AFS ^(b)
Ag, Sn	ICP-OES ^(c)
S	TF ^(d)

3. Результаты.

3.1. Анализ с использованием pXRF.

В общей сложности с помощью pXRF были идентифицированы 35 элементов 97 случайно выбранных образцов горных пород (рис. 2).

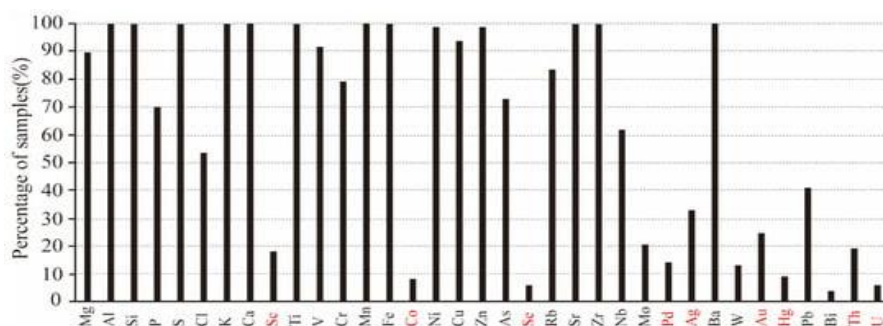


Рис. 2 Процент образцов горных пород, в которых элемент может быть обнаружен с помощью pXRF.

В общей сложности 26 из 35 идентифицированных элементов были измерены с помощью спектрометра pXRF в медно–цинковом режиме для анализа образцов каменного порошка, полученных из вышеупомянутых 97 образцов горных пород (рис. 3).

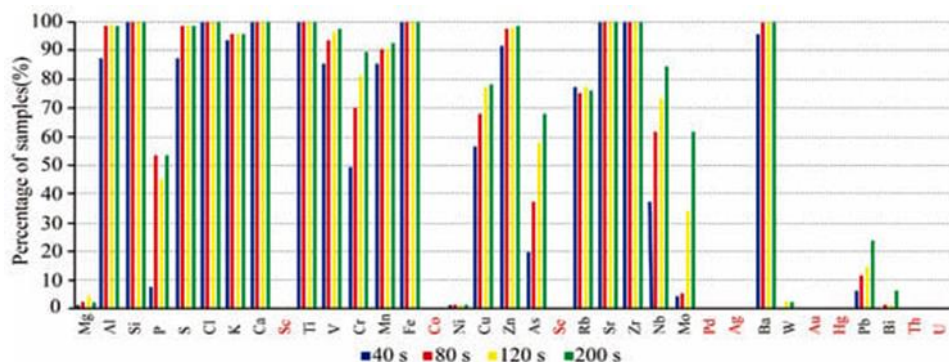


Рис. 3 Процент обнаружения с pXRF образцов каменного порошка на основе различного времени обнаружения.

Результаты показали, что время обнаружения может заметно повлиять на результаты, особенно для большинства микроэлементов. Все идентифицированные элементы могут быть классифицированы на три группы (**G1**: Mg, Ni, W и Bi; **G2**: Al, Ba, Ca, Cl, Si, S, K, V, Ti, Mn, Fe, Rb, Sr, Zn и Zr; и **G3**: As, Cr, Cu, Mo, Nb, P и Pb) в соответствии с различным временем их обнаружения. От группы G1 было получено очень мало информации, поскольку эти элементы

были обнаружены только в небольшом проценте образцов. Группа G2 в основном состояла из породообразующих элементов, которые можно было обнаружить за время обнаружения всего за 40 секунд. Результаты группы G3 показали, что с увеличением времени обнаружения способность к обнаружению возрастает и что G3 содержит, возможно, три наиболее важных геохимических элемента-навигатора для гидротермальных рудных месторождений: Cu, As и Mo.

3.2. Влияние времени обнаружения на погрешность анализа.

Для выяснения взаимосвязи между временем обнаружения и погрешностью анализа для каждого элемента были применены четыре различных времени обнаружения (40, 80, 120 и 200с), когда спектрометр pXRF использовался для анализа 97 образцов порошка горных пород.

Результаты с аналитической погрешностью (т.е. в два раза превышающей стандартное отклонение) сравнивались на основе времени обнаружения каждого элемента, обнаруженного спектрометром pXRF, и сравнительный анализ показал, что аналитическая погрешность уменьшалась с увеличением времени обнаружения. Результаты аналитических ошибок для трех основных элементов (алюминия, кремния и железа) и трех микроэлементов (меди, свинца и цинка) представлены в качестве примеров на рисунке 4.

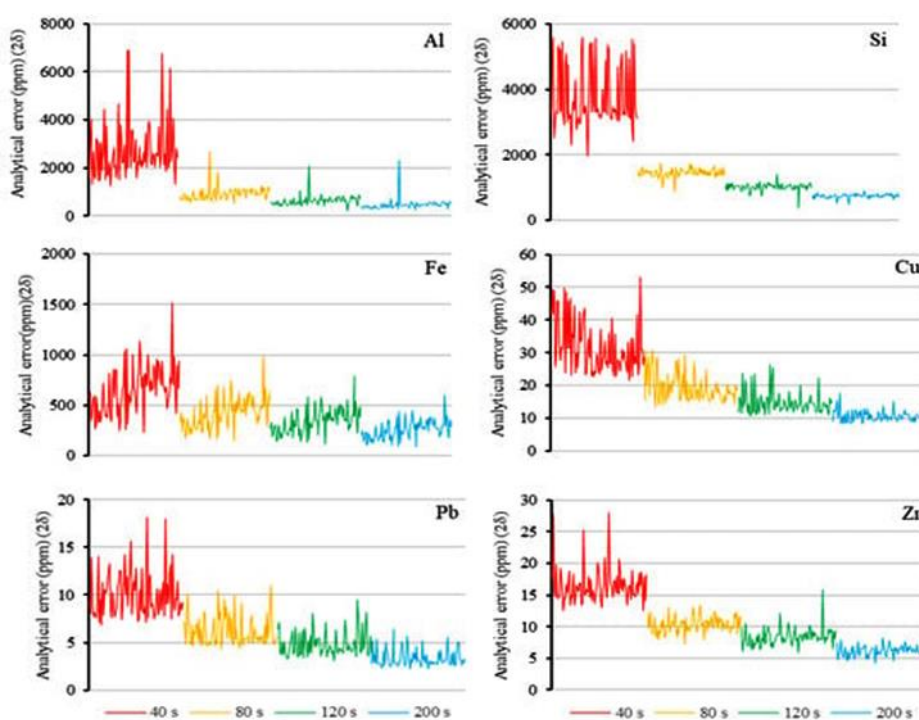


Рис. 4 Погрешность анализа методом pXRF в зависимости от времени обнаружения.

Таблица 2 показывает, что снижение аналитической ошибки было наиболее значительным, когда время обнаружения было увеличено с 40с до 80с, и существует экспоненциальная зависимость между временем обнаружения и аналитической ошибкой.

Взаимосвязь между временем обнаружения и средней погрешностью анализа.

Element \ Time	The Mean Analytical Error of Each Element					
	Al	Si	Fe	Cu	Pb	Zn
40 s	2710.91	3772.4	648.32	31.4	9.96	16.49
80 s	866.82	1445.5	434.67	14.85	5.4	9.45
120 s	623.23	1010.56	340.11	14.45	4.77	8.38
200 s	456.99	733.31	257.27	10.52	3.35	6.26
time(x)-error(y) equation	$y = 2495.8x^{-1.277}$ $R^2 = 0.9768$	$y = 3601.9x^{-1.174}$ $R^2 = 0.9909$	$y = 663.13x^{-0.648}$ $R^2 = 0.988$	$y = 29.483x^{-0.745}$ $R^2 = 0.932$	$y = 9.7808x^{-0.745}$ $R^2 = 0.9714$	$y = 16.146x^{-0.666}$ $R^2 = 0.9752$

Увеличение времени обнаружения с 40с до 80с может привести к относительно значительному снижению погрешности, и колебания погрешности также имеют тенденцию к уменьшению с увеличением времени обнаружения (рис. 4). Таким образом, можно утверждать, что погрешность анализа и его колебания относительно низки и приемлемы.

3.3. Надежность и стабильность pXRF.

Для проверки портативного метода pXRF результаты образцов породы и каменного порошка были сравнены с результатами, полученными с помощью лабораторного анализа. Результаты для восьми распространенных элементов-индикаторов при поисках оруденения (т.е. мышьяка, меди, молибдена, никеля, свинца, серы, титана и цинка) показаны на рисунке 5.

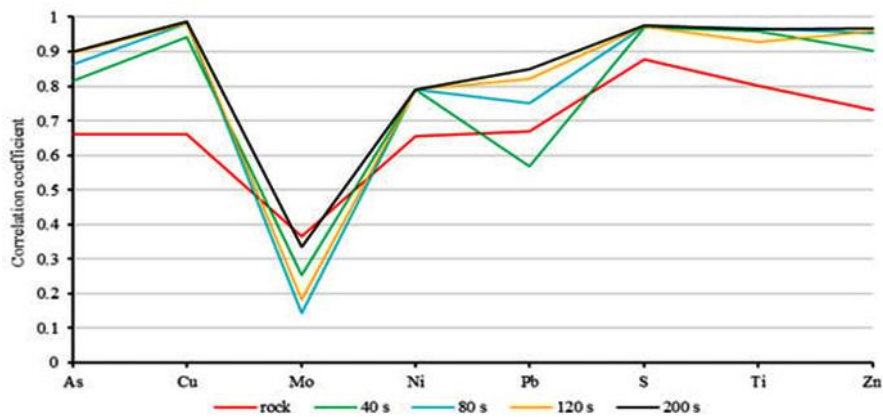


Рис. 5 Сходство результатов анализа pXRF и лабораторного.
(40с, 80с, 120с и 200с - результаты анализа pXRF).

Результат показывает, что достоверность концентраций с помощью анализа pXRF не была одинаковой для разных элементов, причем результаты для молибдена были наименее надежными. Это связано с тем, что концентрация молибдена, определенная с помощью pXRF, была неточной независимо от того, использовался образец породы или каменного порошка. Однако результаты, полученные с помощью pXRF для мышьяка, меди, никеля, свинца, серы, титана и цинка, были относительно надежными, особенно для образцов каменного порошка. Результаты для большинства элементов (например, мышьяка и свинца) оказались более

точными при более длительном времени обнаружения. Однако степень повышения точности была скромной для большинства элементов.

Для проверки достоверности результатов рХRF были случайным образом отобраны 32 образца каменного порошка, которые по отдельности были подвергнуты трем последовательным этапам анализа на основе рХRF. Результаты коэффициента корреляции для этих повторных измерений показаны на рисунке 6. Можно видеть, что все коэффициенты корреляции, за исключением Ni и Cr, были близки к единице.

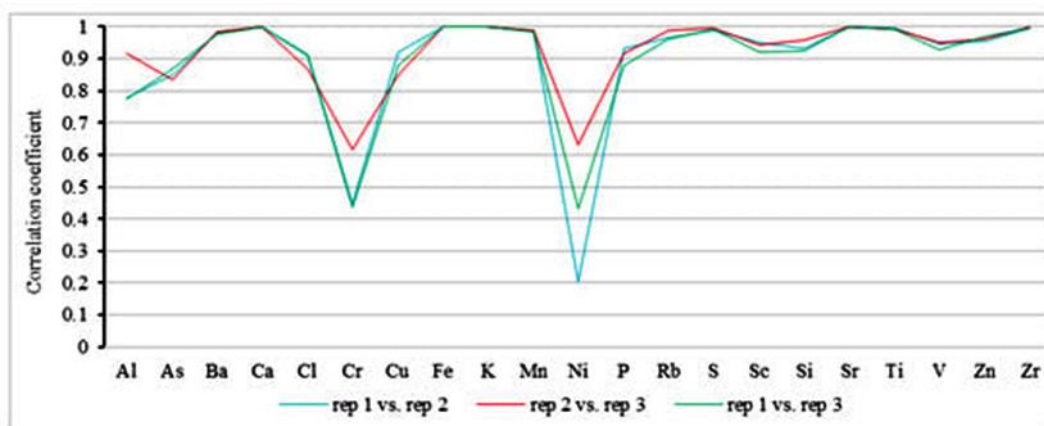


Рис. 6 Корреляция между повторными измерениями образцов порошка горных пород методом рХRF.

4. Обсуждение.

Результаты применения рХRF для анализа подготовленных образцов (например, каменного порошка со средним диаметром частиц менее 75 мкм) могут быть сопоставимы с результатами, полученными с помощью лабораторного анализа. Некоторые предыдущие исследования показали, что другие факторы также могут влиять на результаты анализа на основе рХRF (например, содержание воды, размер образца и шероховатость поверхности). Однако влияние этих факторов на результаты анализа может быть смягчено простой предварительной обработкой, такой как естественная сушка, просеивание и/или дробление. Сравнение результатов, полученных с помощью рХRF, и результатов лабораторного анализа на мышьяк, медь, никель, свинец, серу, титан и цинк показало, что результаты, полученные с помощью анализов на основе рХRF, в целом были надежными, когда образцы были измельчены до размера 75 мкм, а время обнаружения рХRF составляло не менее 40с. Более длительное время обнаружения соответствовало результатам с более высокой точностью и меньшим количеством ошибок. Однако, время обнаружения рХRF не обязательно должно быть очень большим, поскольку его чрезмерное увеличение снизит эффективность. Что еще более важно, для большинства элементов в пределах обнаруживаемого диапазона рХRF увеличение

точности имеет тенденцию становиться менее значительным по мере увеличения времени обнаружения с 40с до 200с.

Можно утверждать, что, хотя результаты анализа некоторых элементов (As, Cu, Ni, Pb, S, Ti и Zn) были приемлемыми при полуколичественном анализе, результаты элементов, помеченных красным цветом на рисунке 2, были неточными. Рисунок 2 также демонстрирует, что элементы, помеченные красным, могут быть обнаружены менее чем в 30% от общего количества образцов, в некоторых даже менее чем в 20%, и элементы, помеченные красным, не могут быть обнаружены, когда образцы горных пород приготовлены в виде каменного порошка (рис. 3). Таким образом, результаты ненадежны или сомнительны при использовании pXRF для образцов горных пород, если с помощью pXRF элемент может быть обнаружен менее чем в 30% от общего количества образцов.

Различные материалы (горные породы, почвы, речные отложения и т.д.), взятые из природных сред, обычно неоднородны. Чтобы получить более точное содержание элементов, образцы должны быть надлежащим образом подготовлены, что в точности соответствует практике, используемой в обычных работах по геохимическому анализу. Поэтому получение точных результатов анализа с использованием обычного геохимического анализа требует много времени и дорого. В отличие от традиционных методов, pXRF повышает эффективность и снижает затраты за счет точности анализа содержания элементов. Поэтому спектрометрия pXRF обычно считается качественным или полуколичественным аналитическим инструментом. Следует отметить, что результаты анализа pXRF действительно не так точны, как лабораторные анализы, но применение pXRF позволяет анализировать больше образцов, а большее количество данных может предоставить больше информации, что повышает надежность результатов анализа pXRF.

Взяв S, Zn, As и Cu — которые являются одними из важных индикаторных элементов при поисках — в качестве примеров, алгоритм интерполяции с обратным взвешиванием по расстоянию (IDW) был использован для отображения их пространственного распределения, и размеры ячеек этих растровых карт были пересчитаны примерно до 200 м в соответствии с плотностью выборки. Результаты демонстрируют, что содержание различных элементов, обнаруженных с помощью pXRF, отличается от результатов лабораторного анализа, но различные методы анализа образцов мало влияют на характеристики пространственного распределения элементов, особенно для S, Zn и Cu, где трудно найти различия между результатами, полученными с помощью разных методов анализа, без тщательного сравнения. Легко найти различия между пространственными распределениями мышьяка, полученными

различными методами анализа, области с высоким содержанием As-pXRF и As-lab похожи (рис. 7).

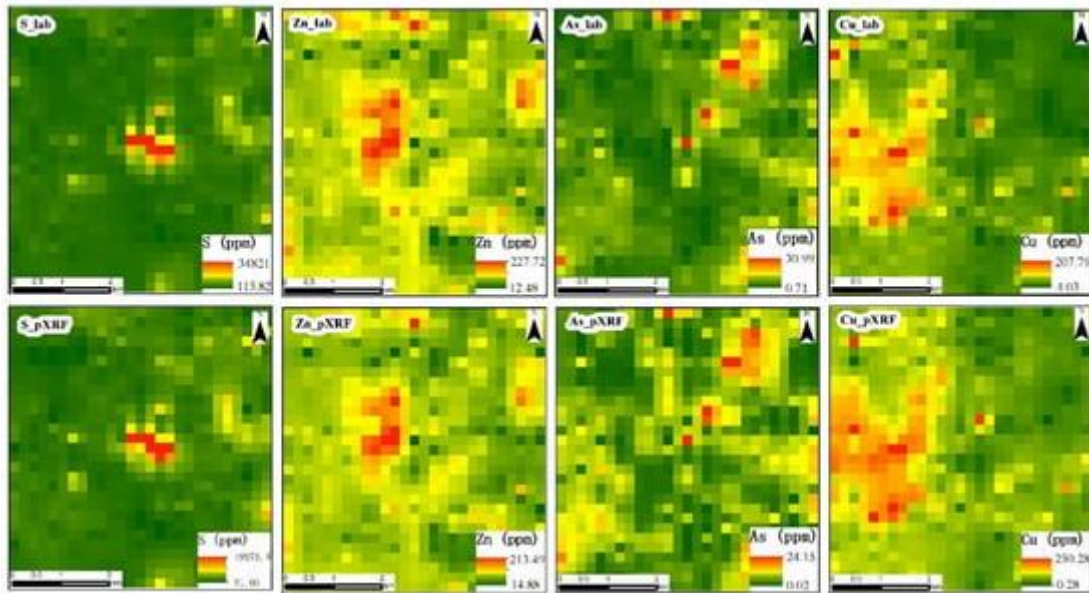


Рис. 7 Пространственное распределение S, Zn, As и Cu, представленное лабораторией (S_lab, Zn_lab, As_lab, Cu_lab) и pXRF (S_pXRF, Zn_pXRF, As_pXRF, Cu_pXRF).

Основной целью геохимической разведки является идентификация и определение аномальных концентраций и пространственных распределений широкого спектра элементов в определенной области. Следовательно, при поисках более важно знать относительные концентрации элементов, чем получать точные значения элементов в разных районах. Анализ на основе pXRF может дать надежные результаты, достаточные для определения относительных концентраций элементов. Таким образом, спектрометрия pXRF является надежным инструментом при поисках рудных месторождений, которые могут определяться значениями As, Cu, Ni, Pb, S, Ti и Zn.

Результаты по нескольким элементам (например, молибдену на рис. 5), представленные pXRF, ненадежны, но погрешность анализа имеет тенденцию к уменьшению со временем. Возьмем молибден в качестве примера: его содержание в большинстве образцов (98,81%) ниже, чем его содержание в континентальной коре Китая согласно лабораторным данным. Следовательно, если содержание некоторых элементов, измеренное с помощью pXRF, ниже, чем их содержание в континентальной коре, данные анализа этих элементов не могут предоставить ценную информацию для поисков, поскольку они указывают, что в этом регионе отсутствует металлогенический потенциал для этого элемента, что само по себе является ценной информацией.

Плотность отбора проб во многих выполненных поисковых проектах относительно низкая, что достаточно для выявления крупномасштабных геохимических аномалий, но не может

соответствовать требованиям выявления мелкомасштабных геохимических аномалий и определения местоположения рудных месторождений. Поэтому в будущем необходимо провести большой объем геохимических поисков с использованием рXRF в полевых условиях.

5. Выводы.

1. рXRF можно использовать для качественного анализа образцов горных пород на некоторые элементы, особенно на элементы с относительно высоким содержанием в отобранных образцах, но некоторые результаты ненадежны, когда рXRF используется в образцах анизотропных горных пород. Результаты рXRF ненадежны при использовании образцов горных пород, если элемент может быть обнаружен только менее чем в 30% от общего количества образцов.

2. Хотя точности анализа может быть недостаточно для использования в традиционной петрологии, общие тенденции результатов, полученных с помощью рXRF, соответствуют результатам лабораторного анализа. Рекомендуется включать этап предварительной обработки (т. е. сушку, просеивание и/или измельчение) для улучшения данных анализа и расширения применимости рXRF-спектрометрии.

3. Было обнаружено, что стабильность спектрометрии рXRF эффективна, когда она применялась к элементам с высоким содержанием в подготовленных образцах. Для большинства элементов в обнаруживаемом диапазоне рXRF более длительное время обнаружения, как правило, повышало надежность результатов; однако улучшение не было значительным для большинства элементов, когда время обнаружения рXRF превышало 80 секунд. Таким образом, предполагается, что адекватное время обнаружения рXRF составляет от 80 до 120с для порошкообразных образцов.

4. В целом, спектрометрия рXRF - это недорогая и эффективная технология, которая может быть использована для определения концентраций десятков элементов в порошкообразных образцах. рXRF является практичным методом геохимических поисков.

ИСТОЧНИКИ:

1. Shuguang Zhou, Jinlin Wang, Wei Wang and Shibin Liao. «EVALUATION OF PORTABLE X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS AND ITS APPLICABILITY AS A TOOL IN GEOCHEMICAL EXPLORATION». *Minerals* 2023, 13.
2. V. Balaram and S. S. Sawant. « INDICATOR MINERALS, PATHfINDER ELEMENTS, AND PORTABLE ANALYTICAL INSTRUMENTS IN MINERAL EXPLORATION STUDIES». *Minerals* 2022, 12.